



Rodrigo Marques Pires

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Simulação Numérica da Atomização de Combustíveis com Interesse para Grandes Motores Diesel Marítimos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Daniel Cardoso Vaz,
Professor Auxiliar, FCT/UNL - DEMI

Co-orientador: Contra-Almirante Francisco de Figueiredo
e Silva Cunha Salvado, Professor Auxiliar Convidado,
FCT/UNL - DEMI



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2013

Simulação Numérica da Atomização de Combustíveis com Interesse para Grandes Motores Diesel Marítimos.

© Rodrigo Marques Pires, FCT-UNL, 2013

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Prefácio

Quando se iniciou a presente dissertação, o objectivo consistia em estudar a viabilidade da substituição do combustível actualmente utilizado pela Marinha Portuguesa, Combustível Naval Destilado, por fuelóleos intermédios, *IFO*, substancialmente mais baratos, visto serem constituídos por uma mistura de óleos destilados e óleos residuais.

Estuda-se a eventual conversão tendo por base o único navio de patrulha oceânica (NPO) da classe Viana do Castelo, por opção da Marinha Portuguesa. A intenção era beneficiar da vantagem económica inerente à substituição do combustível, devendo contudo estar assegurado o cumprimento dos requisitos de operação de um navio militar em primeiro plano, e dos requisitos ambientais em segundo plano.

Este tipo de conversão apresenta um conjunto de problemas derivados das características do combustível, principalmente a sua elevada viscosidade. Estas características complicam o processo de atomização, o que dificulta a combustão. Esta dificuldade acentua-se quando se passa da operação em regime quase permanente (marinha mercante) para um regime muito variável (marinha militar).

Efectuou-se um estudo económico que cedo demonstrou ser muito apelativa esta conversão. A análise técnica foi mais demorada e, após toda a pesquisa, concluiu-se que a gama de motores que equipa o navio já se encontra preparada pelo fabricante, para a utilização de fuelóleos. Assim, este tema estava já suficientemente respondido pelo fabricante dos motores.

Não encontrando objectivos capazes ao intuito de realizar uma dissertação valiosa a nível académico, tomou-se a decisão de enveredar por outro tema relacionado com o processo de atomização.

Esta dissertação estuda o processo de atomização, recorrendo a um código comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional, ANSYS FLUENT. Surgiu a hipótese de colaboração com o Departamento de Ciências Aeroespaciais da Universidade da Beira Interior, com o intuito de simular numericamente algum caso com interesse para aquela instituição, de modo a complementar os estudos experimentais de atomização lá realizados. Como esta hipótese não se concretizou, a solução passou por procurar na literatura, resultados experimentais para validação dos resultados numéricos obtidos nesta dissertação.

Atendendo ao pouco tempo disponível depois de todas estas vicissitudes, pretendo deixar um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Doutor Daniel Cardoso Vaz, por toda a ajuda e principalmente pelo apoio prestado na geração das malhas computacionais, estando ao meu lado em todas as sessões, o que me permitiu encurtar o tempo de execução das mesmas.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Daniel Cardoso Vaz, meu orientador, pela competência científica e acompanhamento do trabalho, pelas críticas, correcções e sugestões relevantes feitas durante a orientação, assim como pelo incentivo e exigência crescente que foi impondo à medida que se caminhava para a conclusão desta dissertação.

Ao Contra-Almirante Francisco Cunha Salvado, meu co-orientador, por ter trazido o tema da dissertação para o Departamento e por ter possibilitado as reuniões com responsáveis da Marinha Portuguesa, promovendo a cooperação entre as duas entidades.

À Marinha Portuguesa, nas pessoas Capitão-de-Mar-e-Guerra Piedade Oliveira e Capitão-de-Fragata Rebocho Antunes por toda a informação fornecida.

Ao Professor André Silva, da Universidade da Beira Interior, pela disponibilidade para discussão dos temas inerentes à dissertação e indicação de artigos científicos relevantes.

A todos os professores que sempre me desejaram o melhor e contribuíram para a minha formação académica, preparando-me para esta dissertação.

Aos meus amigos, eles sabem quem são, pelo espírito de companheirismo, pelo bom ambiente criado e pela ajuda dada, sem a qual eu nunca conseguiria ter alcançado este objectivo.

E, finalmente, aos meus pais e irmão, que sempre me estimularam a crescer científica e pessoalmente. Acima de tudo, pelo inestimável apoio familiar que preencheu as diversas falhas que fui tendo por força das mais diversas circunstâncias, e pela paciência e compreensão reveladas ao longo destes anos.

Resumo

As pesquisas relacionadas com os motores Diesel, impulsionadas por questões ambientais e a demanda global por energia, tornam-se cada vez mais importantes. Por esta razão, o rápido desenvolvimento de motores recorrendo a ferramentas numéricas e computacionais é preferível, em vez da tradicional construção de protótipos.

Nos motores Diesel modernos, a injeção de combustível e a formação da nuvem de gotas são processos que desafiam os engenheiros, pois influenciam significativamente o desempenho termodinâmico e as emissões de poluentes. O estudo da atomização de combustível pode ser feito experimental ou computacionalmente. Esta dissertação enquadra-se nesta última categoria, recorrendo ao código comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional, ANSYS FLUENT.

Inicialmente procedeu-se ao estudo da atomização de combustíveis calculando, com base em relações empíricas da literatura, alguns valores das características das nuvens de gotas para os fuelóleos leve, intermédio e pesado, o que permitiu uma primeira abordagem aos resultados esperados no decorrer da dissertação.

Antes de passar ao modelo numérico, efectuou-se uma malha estruturada bidimensional com elementos quadriláteros, e procedeu-se ao estudo de independência desta. Depois simulou-se a atomização do Diesel de modo a obter a validação do modelo numérico. A validação foi feita com resultados experimentais presentes na literatura e os resultados das simulações apresentam uma precisão consistente com estes, uma vez que foi observado um desvio inferior a 5% para o ângulo da nuvem de gotas, bem como para o *SMD*.

Concluída a validação iniciou-se o estudo da atomização dos fuelóleos. Em comparação com o Diesel, os valores de *SMD* para os fuelóleos foram sempre entre 40 a 50 μm superiores. Mesmo com o aumento da temperatura de injeção dos fuelóleos, as diferenças mantiveram-se significativas em relação ao Diesel, apresentando valores cerca de 30 μm superiores. No entanto, com este aumento de temperatura, apesar das diferenças nas características iniciais dos fuelóleos, todos convergem para valores muito semelhantes de *SMD*, com diferenças inferiores a 10 μm entre os fuelóleos.

Palavras-chave

Diesel, Atomização, Dinâmica dos Fluidos Computacional, Fuelóleo, *SMD*

Abstract

The research related to Diesel engines, driven by environmental issues and global energy demand, become increasingly important. For this reason, rapid development of engines using numerical and computational tools is preferred, rather than the conventional prototype construction.

In modern Diesel engines, the fuel injection and the spray formation are processes that challenge engineers, because they significantly influence the thermodynamic performance and pollutant emissions. The study of fuel atomization can be done experimentally or computationally. This thesis falls into this latter category, using the Computational Fluid Dynamics commercial code ANSYS FLUENT.

Initially, was made the study of fuel atomization calculating, based on literature empirical results, some values of the characteristics of sprays for light, intermediate and heavy fuel oils, allowing a first approximation to the expected results in the course of the dissertation.

Before turning to the numerical model, was made the two-dimensional structured mesh with quadrilateral elements, and proceeded to his study of independence. After, were simulated Diesel sprays in order to obtain numerical model validation. The validation was performed on experimental results available on literature and simulations results show a consistent accuracy with these, since it was observed a deviation of less than 5% for the spray angle, as well as for SMD.

After the validation, began the study of fuel oils atomization. Compared with Diesel, SMD values for fuel oils are always between 40 and 50 μm above. Even with the increased fuel oils injection temperature, the differences are still significant compared to Diesel, with values 30 μm above. However, with this temperature rise, despite the differences in initial characteristics of fuel oils, all converge to similar values of SMD, with differences of less than 10 μm between the fuel oils.

Keywords

Diesel, Atomization, Computational Fluid Dynamics, Fuel Oil, SMD

Nomenclatura

Os símbolos utilizados ao longo desta dissertação estão listados aqui, juntamente com as suas dimensões. Estes estão categorizados em Caracteres Latinos e Caracteres Gregos. As constantes e variáveis são escritas nos estilos romano e itálico, respectivamente. No entanto, as variáveis podem não aparecer em itálico em figuras e gráficos, dependendo da sua fonte, mas o seu significado deve ser claro a partir do contexto. Se um subscrito é usado com vários símbolos, então aparece numa lista dedicada a subscritos, caso contrário, se usado com um único símbolo, só aparece associado à entrada do símbolo na lista principal. Também se fornece uma lista dos prefixos e abreviaturas utilizados no texto.

Caracteres Latinos

B_0	constante do modelo <i>Wave</i>
C_A	coeficiente geométrico do atomizador
C_D	coeficiente de arrasto
C_d	coeficiente de descarga
c_p	calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
D, d	diâmetro do atomizador (m)
d_{32}, x_{32}	diâmetro médio de Sauter (μm)
E	energia (J)
F	força externa resultante da interação das fases dispersa e contínua (N)
F_D	força de arrasto (N)
g	aceleração da gravidade (m s^{-2})
G_b	geração de energia cinética devido à flutuação
G_k	geração de energia cinética devido aos gradientes de velocidade média
h	entalpia (J)
J	difusividade ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
K	número de cavitação
K_{crit}	valor crítico de cavitação
K_{insep}	valor a que se inicia a cavitação
L	comprimento do atomizador (m)
L_b	comprimento de desintegração (μm , mm)
\dot{m}_L	caudal de líquido (kg s^{-1})
N	número de gotas; número total de espécies
Oh	número de Ohnesorge
P, p	pressão (Pa)

p_{vap}	pressão de vaporização (Pa)
R	rácio de produção de espécies por reacção química
r	coordenada axial (m); raio do lábio de entrada do atomizador (mm)
Re	número de Reynolds
S	rácio de produção de espécies por adição da fase dispersa
S_h	calor da reacção química (J)
S_m	massa da fase dispersa adicionada à fase contínua (kg)
T	temperatura (K)
T_{ref}	temperatura de referência (K)
t	tempo (s)
u, v	velocidade ($m\ s^{-1}$)
U_R	velocidade relativa ($m\ s^{-1}$)
v_r	velocidade radial ($m\ s^{-1}$)
v_x	velocidade axial ($m\ s^{-1}$)
We	número de Weber
x	coordenada axial (m)
Y	fracção mássica
Y_M	contribuição da dilatação na turbulência compressível para a taxa de dissipação geral
Z	índice equivalente ao número de Ohnesorge

Caracteres Gregos

Δ	diferença
∂	derivada
ε	taxa de dissipação da energia cinética
η	deslocamento infinitesimal
θ	ângulo da nuvem de gotas (rad ,deg)
κ	condutividade térmica ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)
κ	energia cinética turbulenta (J)
κ_t	condutividade térmica turbulenta ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)
Λ	comprimento de onda (m)
λ	constante de evaporação ($m^2\ s^{-1}$)
μ	viscosidade dinâmica ($N\ s\ m^{-2}$)
ρ	densidade ($kg\ m^{-3}$)
Σ	somatório
σ	tensão superficial ($N\ m^{-1}$)
σ_ε	número de Prandtl para ε

σ_κ	número de Prandtl para κ
ν	viscosidade cinemática ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
Φ	razão de equivalência
$\bar{\tau}$	tensor das tensões (Pa)
Ω	frequência (Hz)

Subscritos

A	ambiente (meio gasoso)
a	número inteiro
amb	ambiente (meio gasoso)
b	número inteiro
cam	referente à ante-câmara do atomizador
eff	efectiva
g	meio gasoso
HS	limite superior de SMD
i	classe de gotas; espécie; referente à injeção
inj	referente à injeção
l	líquido
LS	limite inferior de SMD

Prefixos

M	Mega, 10^{+6}
k	Kilo, 10^{+3}
m	mili, 10^{-3}
μ	micro, 10^{-6}

Abreviaturas

$ASTM$	Sociedade Americana de Testes e Materiais (“ <i>American Society for Testing and Materials</i> ” na literatura inglesa)
CEE	Comunidade Económica Europeia
CO	Monóxido de Carbono
DPM	Modelo de Fase Dispersa (“ <i>Discrete Phase Model</i> ” na literatura inglesa)
EUA	Estados Unidos da América
IFO	Fuelóleo Intermédio (“ <i>Intermediate Fuel Oil</i> ” na literatura inglesa)

<i>ISO</i>	Organização Internacional para a Padronização (“ <i>International Organization for Standardization</i> ” na literatura inglesa)
<i>MDF</i>	Método das Diferenças Finitas
<i>MVF</i>	Método dos Volumes Finitos
<i>NO</i>	Monóxido de Azoto
<i>NPO</i>	Navio de Patrulha Oceânica
<i>OPEP</i>	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
<i>SMD</i>	Diâmetro Médio de Sauter (“ <i>Sauter Mean Diameter</i> ” na literatura inglesa)
<i>TAB</i>	Modelo de Analogia de Taylor (“ <i>Taylor Analogy Breakup</i> ” na literatura inglesa)
<i>UHC</i>	Hidrocarbonetos Não Queimados (“ <i>Unburned Hydrocarbons</i> ” na literatura inglesa)
<i>VOF</i>	Modelo de volume de fluido (“ <i>Volume of Fluid</i> ” na literatura inglesa)

Índice

Prefácio	v
Agradecimentos	vii
Resumo	ix
<i>Abstract</i>	xi
Nomenclatura.....	xiii
Índice	xvii
Índice de Figuras	xxi
Índice de Tabelas	xxv
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Considerações Gerais	1
1.2 Contribuição do Presente Trabalho	3
1.3 Estrutura da Dissertação.....	4
Capítulo 2 Estudo Bibliográfico	7
2.1 Fundamentos Teóricos da Atomização	7
2.1.1 Desintegração de Jactos de Líquido	7
2.1.2 Desintegração Primária	7
2.1.3 Desintegração Secundária	12
2.1.4 Estrutura do Jacto	14
2.1.5 Atomizadores	15
2.1.5.1 Atomizadores de Pressão ou Hidráulicos.....	16
2.1.5.1.1 Atomizadores de Orifício Plano.....	16

2.1.5.2	Atomizadores Rotativos.....	16
2.1.5.3	Atomizadores de Dois Fluidos ou Pneumáticos.....	17
2.2	Resultados de Caracterização de Nuvens de Gotas.....	17
2.2.1	Propriedades dos Líquidos	17
2.2.2	Condições Ambientais.....	20
2.2.3	Comprimento de Desintegração	21
2.2.4	Ângulo da Nuvem de Gotas	22
2.2.5	Diâmetro de Gotas e Distribuição de Tamanho de Gotas	23
2.2.5.1	Definição de Diâmetros Médios.....	24
2.2.5.2	Distribuição do Tamanho de Gotas.....	24
2.2.5.3	Influência dos Parâmetros de Injecção.....	25
Capítulo 3 Aplicação de Relações Empíricas da Literatura.....		29
3.1	Comprimento de Desintegração	29
3.2	Ângulo da Nuvem de Gotas	31
3.3	Diâmetro Médio de Sauter (<i>SMD</i>).....	33
Capítulo 4 Modelação Numérica.....		35
4.1	Descrição do Modelo Numérico.....	35
4.2	Equações	36
4.2.1	Conservação da Massa	36
4.2.2	Conservação da Quantidade de Movimento.....	37
4.2.3	Energia	37
4.2.4	Transporte das Espécies	38
4.2.5	Turbulência.....	39
4.3	Modelo de Fase Dispersa, <i>DPM</i>	40
4.3.1	Modelo de Atomizador.....	41
4.3.2	Movimento de Partículas.....	42
4.3.3	Acoplamento de Fases.....	43
4.3.4	Colisão e Desintegração	44
4.3.5	Limitações	46

4.4	Esquemas Numéricos	47
4.5	Geração da Malha.....	47
4.5.1	Condições de Fronteira.....	49
4.6	Validação do Modelo Numérico	50
4.6.1	Estudo de Independência da Malha.....	50
4.6.2	Comparação com Resultados da Literatura.....	53
4.6.3	Conclusões da Validação	56
Capítulo 5 Resultados.....		57
5.1	Fuelóleos à Temperatura Ambiente	57
5.2	Fuelóleos Aquecidos	59
Capítulo 6 Conclusão		63
6.1	Conclusões Principais	63
6.2	Sugestões Para Trabalho Futuro.....	64
Referências Bibliográficas		65

Índice de Figuras

Figura 1.1: Espectro de tamanhos de gota [1]	1
Figura 1.2: Fluxograma da otimização do modelo de atomização do combustível Diesel	4
Figura 2.1: Regimes de desintegração primária de líquidos em função dos números de Reynolds e Ohnesorge [9]	9
Figura 2.2: Regimes de desintegração primária de líquidos em função do número de Reynolds e da densidade do meio gasoso [9].....	9
Figura 2.3: Regimes de desintegração primária de líquidos em função dos números de Reynolds e Ohnesorge, e da densidade do meio gasoso [7].....	10
Figura 2.4: Imagem típica dos quatro regimes de desintegração primária [9].	11
Figura 2.5: Regimes de desintegração secundária em função do aumento do número de Weber [7]	12
Figura 2.6: Fenómenos físicos que conduzem ao regime de desintegração catastrófica [15]	13
Figura 2.7: Zonas características da atomização [13]	14
Figura 2.8: (a) Atomizadores de Pressão; (b) Atomizadores Rotativos; (c) Atomizadores de Dois Fluidos [1].....	16
Figura 2.9: Tipos de atomizadores [10].	17
Figura 2.10: Variação do <i>SMD</i> com a densidade do líquido [22]	18
Figura 2.11: Variação do <i>SMD</i> com a tensão superficial do líquido [22].	19
Figura 2.12: Variação do <i>SMD</i> com a viscosidade do líquido [22].....	19
Figura 2.13: Influência da pressão do meio gasoso no <i>SMD</i> [27].....	21
Figura 2.14: Influência da velocidade de injeção no comprimento de desintegração [29]	21
Figura 2.15: Influência do diâmetro do atomizador no comprimento de desintegração [29]	21

Figura 2.16: Influência da razão L/d do atomizador no comprimento de desintegração [29]	22
Figura 2.17: Comportamento de desintegração de um jacto de líquido [29]	22
Figura 2.18: Definição de ângulo da nuvem de gotas Diesel [30]	22
Figura 2.19: Características geométricas do atomizador de orifício plano [31]	23
Figura 2.20: Influência da viscosidade cinemática e da pressão de injeção no ângulo da nuvem de gotas [29]	23
Figura 2.21: Influência da pressão de injeção no SMD [29]	25
Figura 2.22: Influência da viscosidade e da pressão de injeção no SMD [29]	25
Figura 2.23: Influência da razão L/d no SMD [29]	26
Figura 2.24: Influência da pressão ambiente no SMD [29]	26
Figura 2.25: SMD em vários locais de amostragem [33]	26
Figura 2.26: Influência do SMD na formação de resíduos de combustão [6]	27
Figura 2.27: Influência da atomização do combustível nas emissões de CO [6]	27
Figura 2.28: Influência da atomização do combustível nas emissões de NO [6]	27
Figura 2.29: Influência da atomização do combustível nas emissões de UHC [6]	27
Figura 3.1: Características principais das nuvens de gotas [29]	29
Figura 3.2: Influência da velocidade de injeção no comprimento de desintegração	30
Figura 3.3: Influência do diâmetro do atomizador no comprimento de desintegração	31
Figura 3.4: Influência do diâmetro do atomizador no ângulo da nuvem de gotas	32
Figura 3.5: Influência da pressão ambiente no ângulo da nuvem de gotas	32
Figura 3.6: Influência da velocidade de injeção no SMD	34

Figura 4.1: Regimes de escoamento de atomizadores de orifício plano (adaptado de [31]).	41
Figura 4.2: Esquema do cálculo inicial do diâmetro e velocidade das gotas.	42
Figura 4.3: Procedimento de resolução de acoplamentos de uma e duas vias.	43
Figura 4.4: Transferência de massa, quantidade de movimento e calor entre as fases dispersa e contínua [31].	44
Figura 4.5: Esquema do modelo de desintegração <i>Wave</i> [48].	45
Figura 4.6: Esquema do domínio computacional.	49
Figura 4.7: Condições de fronteira do domínio computacional.	50
Figura 4.8: Malha 1.	51
Figura 4.9: Malha 4.	51
Figura 4.10: Perfis de velocidade das gotas ao longo do eixo do jacto.	52
Figura 4.11: Mapas de magnitude da velocidade das gotas Diesel, em m/s, com o aumento da velocidade de injeção, ao longo do eixo do jacto.	54
Figura 4.12: Comparação dos valores de ângulo da nuvem de gotas.	55
Figura 4.13: Comparação dos valores de <i>SMD</i> .	55
Figura 5.1: Mapas de magnitude da velocidade das gotas dos combustíveis estudados, em m/s, ao longo do eixo do jacto.	58
Figura 5.2: Valores de <i>SMD</i> dos combustíveis estudados.	58
Figura 5.3: Diagrama Temperatura – Viscosidade dos combustíveis [51].	59
Figura 5.4: Mapas de magnitude da velocidade das gotas dos fuelóleos aquecidos, em m/s, ao longo do eixo do jacto.	60
Figura 5.5: Valores de <i>SMD</i> dos fuelóleos aquecidos.	61

Figura 5.6: Comparação dos resultados de <i>SMD</i> do fuelóleo leve.....	61
Figura 5.7: Comparação dos resultados de <i>SMD</i> do fuelóleo intermédio.....	62
Figura 5.8: Comparação dos resultados de <i>SMD</i> do fuelóleo pesado	62

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Propriedades de alguns combustíveis líquidos (adaptado de [10]).....	20
Tabela 2.2: Diâmetros médios de gota e respectivas aplicações (adaptado de [1]).....	24
Tabela 4.1: Resumo dos parâmetros numéricos utilizados.	47
Tabela 4.2: Resolução das malhas estudadas.	50
Tabela 4.3: Geometria do atomizador utilizada no estudo.	53
Tabela 4.4: Condições de injeção relevantes.....	53
Tabela 5.1: Condições de injeção dos combustíveis em estudo.	57
Tabela 5.2: Temperaturas de pré-aquecimento dos fuelóleos.	60

Capítulo 1

Introdução

Nesta introdução pretende-se realçar a importância da atomização e fornecer uma visão global do trabalho desenvolvido. Assim, começa-se por fazer uma breve introdução ao tema da atomização e seguidamente apresentam-se os principais objectivos e metodologia adoptada. Posteriormente é referida a contribuição do presente trabalho e no final descreve-se a estrutura da dissertação.

1.1 Considerações Gerais

As nuvens de gotas consistem em gotículas de diversos tamanhos, dispersas num meio gasoso. Estão à nossa volta e são indispensáveis a muitas actividades diárias. Incluem fenómenos naturais tais como a chuva e nevoeiro, ou são geradas através de dispositivos para diferentes aplicações, como na medicina (administração de medicamentos pulmonares), na cosmética (perfumes), em diversas indústrias (pintura e injeção), na agricultura (pulverização de pesticidas), em sistemas de supressão de incêndios (extintores) e em aplicações domésticas (impressoras). A Figura 1.1 [1] apresenta um espectro típico do tamanho de gotas de alguns fenómenos naturais e aplicações industriais.

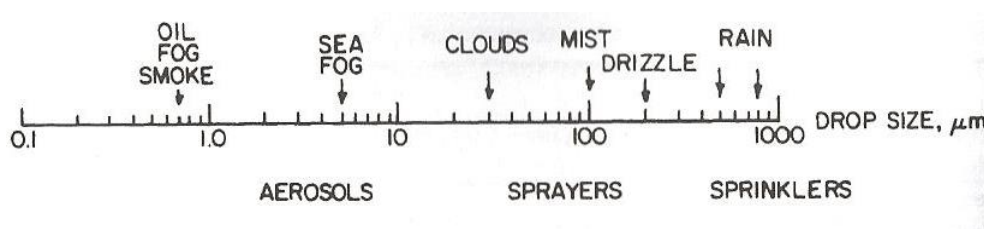


Figura 1.1: Espectro de tamanhos de gota [1].

Os atomizadores mais usuais geram gotas cujas dimensões variam desde apenas alguns micrómetros até cerca de 800 μm . O critério para seleccionar o tamanho mais adequado e a uniformidade das gotas em vários sistemas de atomização depende da aplicação específica. Na medicina, por exemplo, exigem-se nuvens de gotas com poucos micrómetros, a fim de permitir a circulação destas através das vias respiratórias até atingirem os pulmões. Por outro lado, para a agricultura ou sistemas de supressão de incêndios exige-se que as gotas sejam suficientemente grandes, de modo a não serem desviadas pelo vento. No caso dos motores de combustão, impõe-se um equilíbrio entre a quantidade de gotas menores, necessárias para iniciar um sistema frio, e a quantidade de gotas maiores, necessárias para controlar a estabilidade da chama.

Inúmeras conferências e publicações científicas nesta área, atestam a importância da atomização nos mais diversos campos da ciência e da engenharia. Esta importância motivou inclusive a criação de diferentes normas técnicas, como por exemplo as *ASTM E1260-03* [2], *E1260-97* [3], *E799-03* [4] e a *ISO 13320* [5], para normalizar a informação e terminologia dos diversos investigadores e para melhorar o processamento e análise da atomização.

Como o objectivo desta dissertação é vocacionado para o desenvolvimento de motores Diesel marítimos, focar-se-á nos sistemas de atomização aplicados na injeção de combustível. Contudo, a metodologia aqui desenvolvida é geral e, com algumas modificações, pode ser utilizada em outras aplicações de sistemas de atomização.

O interesse em melhorar o desempenho dos sistemas propulsores vem de dois sectores bem definidos, nomeadamente, ambiente e energia. Do ponto de vista ambiental, nos Estados Unidos da América a *Air Pollution Control Act* tornou-se lei em 1955, seguida pela *Air Pollution Control Law* em 1968 no Japão, e por último, a Directiva 70/220/CEE do Conselho Europeu em Março de 1970. Estas foram as primeiras iniciativas governamentais destinadas a limitar as emissões poluentes para a atmosfera.

Finalmente, a crise ambiental foi reconhecida oficialmente em 22 de Abril de 1970, o que motivou inúmeras discussões sobre o tema e culminou com o histórico protocolo de Quioto em 1997, visto como o maior plano mundial até à data, para combater o aquecimento global e melhorar o desenvolvimento sustentável do planeta. Apesar da sua rejeição pelos EUA, um dos maiores poluidores mundiais, o protocolo foi ratificado por 141 países e entrou em vigor em 16 de Fevereiro de 2005. O protocolo estabelece metas que visam a redução de gases de efeito de estufa, principalmente dióxido de carbono.

Do ponto de vista energético, os alarmes da crise soaram com o embargo petrolífero dos países membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) e do Golfo Pérsico em 1973, e posteriormente com a primeira e segunda Guerra do Golfo em 1991 e 2003, respectivamente. Desde então, nos países industrializados, o aclamado desenvolvimento sustentável tem sido motivação para vários estudos que conduzem a nova legislação e novas tecnologias.

Neste contexto, a optimização de sistemas de atomização é muito atractiva, pois o uso de combustíveis provenientes de hidrocarbonetos não renováveis em motores de combustão interna e centrais eléctricas é responsável pela maior parte da produção de energia e emissões atmosféricas no mundo.

1.2 Contribuição do Presente Trabalho

Embora haja muita investigação e informação disponível no que diz respeito ao comportamento da atomização do combustível Diesel, esta dissertação pretende contribuir explorando o comportamento de fuelóleos.

Assim, a grande contribuição da presente dissertação é a análise da qualidade da atomização destes combustíveis, com base nas características macroscópicas desta.

O domínio computacional é bidimensional e os parâmetros considerados na análise são o ângulo da nuvem de gotas e o diâmetro médio de Sauter. A penetração da nuvem não é alvo de estudo uma vez que se procederam a simulações em regime contínuo, independentes do tempo de injeção.

Salienta-se que este é um trabalho exploratório no sentido em que é o primeiro trabalho no Departamento a estudar o fenómeno da atomização de combustíveis, abrindo o caminho para futuros trabalhos nesta área. Assim, ficam desde já referenciadas algumas sugestões, como efectuar o estudo com uma malha tridimensional, avaliar o comprimento de desintegração, proceder a simulações em regime transiente de modo a avaliar a penetração da nuvem de gotas e implementar um modelo de combustão que permita prever as emissões poluentes.

O objectivo principal da presente dissertação é estudar o padrão de atomização em motores Diesel e como este pode ser modificado de modo a contribuir para a conversão destes motores para queima de combustíveis alternativos, nomeadamente fuelóleos, combustíveis com interesse para grandes motores Diesel marítimos.

Inicialmente serão calculados, com base em relações empíricas, alguns valores para as características macroscópicas da atomização: comprimento de desintegração, ângulo da nuvem de gotas e diâmetro médio de Sauter, *SMD*. O que permitirá obter uma primeira apreciação dos valores esperados.

De seguida será simulado um caso de atomização Diesel, estudado experimentalmente na literatura, para depois realizar simulações com fuelóleos, permitindo obter as características da atomização destes combustíveis, com base nas suas propriedades físicas e nas características do atomizador. Para tal, recorre-se ao código comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional, ANSYS FLUENT. A malha que permite a discretização do domínio de cálculo é gerada no programa GAMBIT, sendo também estudada a sua independência. Os esquemas numéricos inerentes ao código serão, primeiro, objecto de um estudo pormenorizado pretendendo-se identificar as suas possíveis limitações, vantagens e desvantagens.

A metodologia de trabalho apoia-se essencialmente em duas partes, validação e estudo numérico. Na primeira parte, validação, simula-se a atomização Diesel e os resultados numéricos são comparados e validados com resultados experimentais da literatura. Na segunda parte, estudo numérico, aplica-se o modelo numérico validado anteriormente, na simulação da

atomização de fuelóleos, mantendo-se os esquemas numéricos. Com os dados obtidos da aplicação do modelo numérico, procede-se ao estudo comparativo que consiste na verificação das características macroscópicas da atomização.

A optimização do modelo de atomização Diesel realiza-se seguindo o fluxograma apresentado na Figura 1.2.

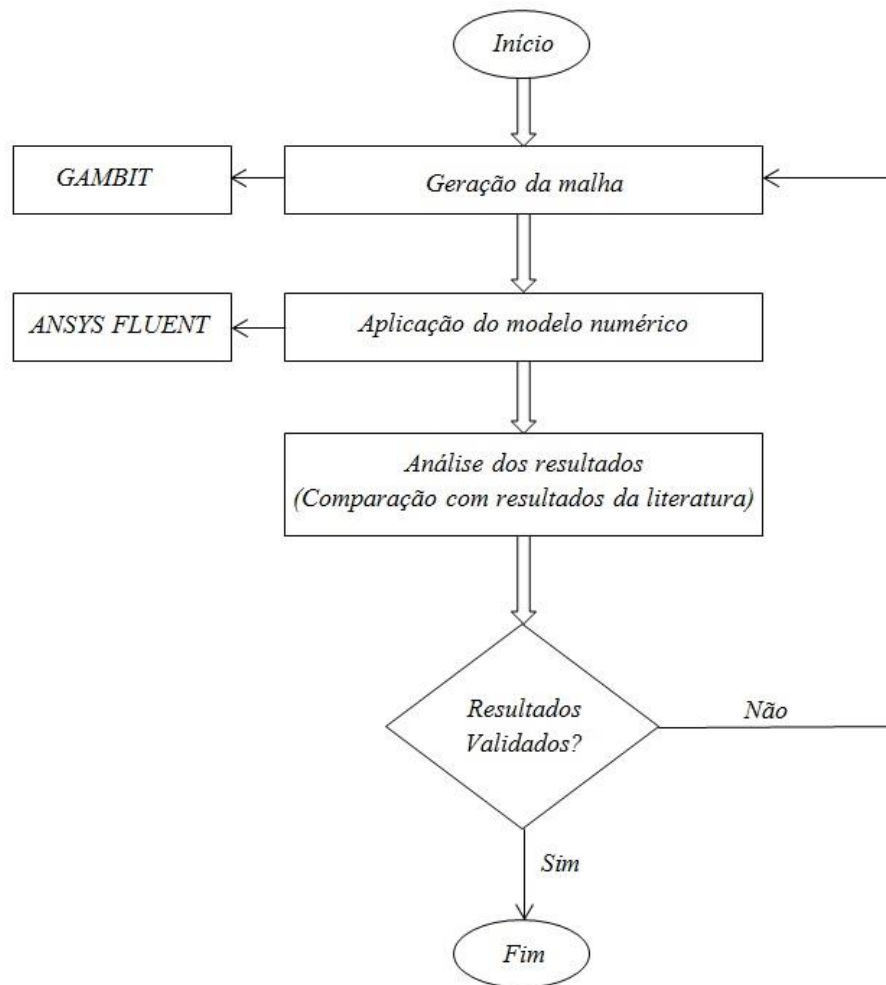


Figura 1.2: Fluxograma da optimização do modelo de atomização do combustível Diesel.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos: Introdução, Estudo Bibliográfico, Aplicação de Relações Empíricas da Literatura, Modelação Numérica, Resultados e por fim a Conclusão.

Na **Introdução**, Capítulo 1, apresentam-se as condições gerais, as principais motivações, objectivos e metodologias que estiveram na base do trabalho desenvolvido. Apresenta-se também a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2, reservado ao **Estudo Bibliográfico**, começa por apresentar uma breve revisão dos fundamentos teóricos da atomização para depois evidenciar os resultados da literatura que permitirão validar o modelo numérico.

No Capítulo 3, **Aplicação de Relações Empíricas da Literatura**, são calculados, com base em relações empíricas, alguns valores das características macroscópicas da nuvem de gotas para os combustíveis em estudo.

No Capítulo 4, **Modelação Numérica**, descreve-se o modelo numérico utilizado, as equações e os submodelos necessários, as formas de geração da malha e as condições de fronteira no domínio de cálculo. Após esta primeira fase, efectua-se o estudo de independência da malha e depois são validados os parâmetros numéricos. São apresentados os resultados das simulações realizadas com combustível Diesel e comparam-se estes resultados com dados experimentais obtidos na literatura.

No Capítulo 5, **Resultados**, aplica-se o modelo numérico validado no capítulo anterior, usando fuelóleos como combustível em vez de Diesel. Na parte final do capítulo são apresentados os resultados obtidos, verificando as diferenças na atomização relativamente ao Diesel.

Finalmente, no Capítulo 6, apresenta-se a **Conclusão** que decorre da análise global do trabalho realizado, as contribuições propostas no presente trabalho e ainda as sugestões para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Estudo Bibliográfico

Este Capítulo é dedicado ao estudo bibliográfico de aspectos que assumem especial realce no desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente faz-se uma descrição dos fundamentos teóricos da atomização e por fim apresentam-se alguns resultados de estudos experimentais realizados por outros autores, com relevância para este trabalho pois permitirão validar os resultados numéricos.

2.1 Fundamentos Teóricos da Atomização

O conceito de injectar líquido através de um pequeno orifício pode parecer um processo trivial, mas a física inerente à formação de nuvens de gotas é extremamente complexa. Assim, a compreensão dos seus fundamentos físicos é valiosa para a simulação computacional.

Nesta secção são apresentados os fundamentos teóricos da atomização, entre os quais os regimes de desintegração. Estas considerações não implicam pressupostos sobre as características do líquido, de modo que são válidas para a generalidade das nuvens de gotas.

Estudos mais detalhados sobre atomização podem ser encontrados em Lefebvre [1], [6].

2.1.1 Desintegração de Jactos de Líquido

No sentido de uma definição mais ampla, desintegração inclui não só o processo em que um líquido se divide em gotas sob a acção de forças internas e externas, mas também o processo em que uma gota se separa em duas gotas mais pequenas, ou num número maior de gotas significativamente menores.

Com base nesta distinção, o processo de desintegração pode ser dividido em duas partes, a desintegração primária e a desintegração secundária, como apresentado abaixo.

2.1.2 Desintegração Primária

Quando um líquido emerge a partir de um atomizador de orifício plano, tal como o atomizador de um injector Diesel, se a velocidade de injeção e o nível de cavitação não excederem um certo valor, ele adquire a forma de uma coluna cilíndrica. As várias forças, internas e externas, concorrentes sobre a superfície desta coluna de líquido criam oscilações e perturbações. Se estas forem amplificadas de forma crítica, o líquido desintegra-se em gotas.

Este processo designa-se por desintegração primária e é importante porque com o início do processo de atomização e em função da extensão do núcleo líquido, fornece as condições iniciais para a formação da zona dispersa da nuvem de gotas [1].

Dependendo das condições físicas, este processo pode ser de natureza diversa, exibindo características substancialmente diferentes. A categorização destes tipos de desintegração pode basear-se em várias considerações, no entanto a base fundamental é fornecida pelos três parâmetros adimensionais mais importantes relativamente à desintegração:

1. O número de Reynolds representa a relação entre forças de inércia e forças viscosas e é definido na literatura como apresentado na Equação 2.1 [7]:

$$Re = \frac{u \rho_l d}{\mu_l} . \quad (2.1)$$

2. O número de Weber representa a relação entre a força aerodinâmica e a tensão superficial, e pode ser definido de duas formas, dependendo dos fenómenos físicos que se pretendam descrever [7]:

$$We_g = \frac{u^2 \rho_g d}{\sigma} , \quad (2.2)$$

$$We_l = \frac{u^2 \rho_l d}{\sigma_l} . \quad (2.3)$$

Em análise experimental existe uma certa liberdade na escolha do número de Weber. A escolha pode depender do tipo de experiência, por exemplo para situações sem variação da densidade do líquido, o número de Weber relativo a gases pode ser opção.

3. O terceiro parâmetro relevante é o número de Ohnesorge, também muitas vezes referido como número de Laplace, índice de viscosidade ou índice Z, que representa a relação entre as forças viscosas e a tensão superficial, e é definido como [7]:

$$Oh = \frac{\sqrt{We_l}}{Re} = \frac{\mu_l}{\sqrt{\sigma d \rho_l}} . \quad (2.4)$$

Se o número de Ohnesorge for usado para representar as forças viscosas durante a desintegração, tem que se assumir que a viscosidade do meio gasoso é reduzida comparada com a do líquido, uma vez que este parâmetro envolve apenas as propriedades das gotas.

A classificação mais aceite dos regimes de desintegração primária expectáveis em função destes parâmetros foi criada por Ohnesorge e desenvolvida por Reitz [8], através da introdução de uma distinção entre o primeiro e o segundo regime de vento induzido, “*first wind-induced*” e “*second wind-induced*” na literatura inglesa, presente no gráfico da Figura 2.1 [9].

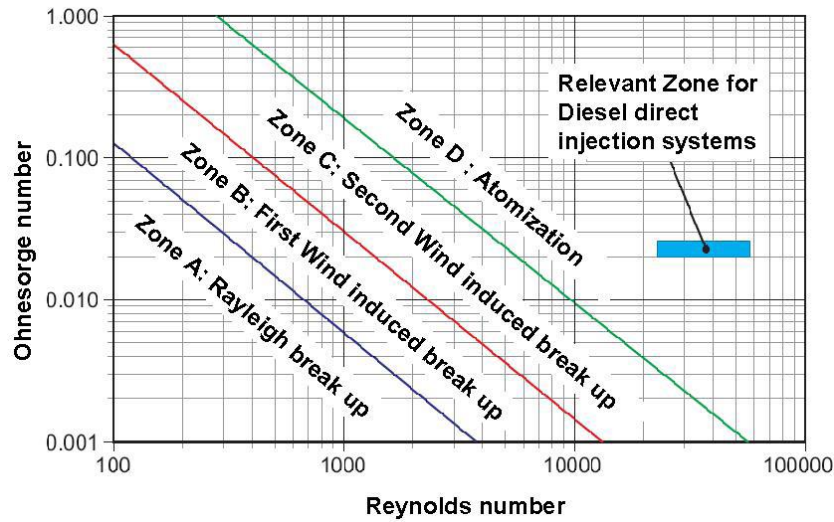


Figura 2.1: Regimes de desintegração primária de líquidos em função dos números de Reynolds e Ohnesorge [9].

No entanto, este gráfico não considera a densidade do meio gasoso, que é também um factor importante relacionado com a desintegração. Quanto maior a densidade do meio, maior o deslocamento de todas as linhas de divisão para a esquerda.

De modo a mostrar este efeito, Schneider [9] recolheu uma série de resultados da literatura e criou um gráfico, apresentado na Figura 2.2 [9], que apresenta os regimes de desintegração em função do número de Reynolds e da densidade do meio gasoso.

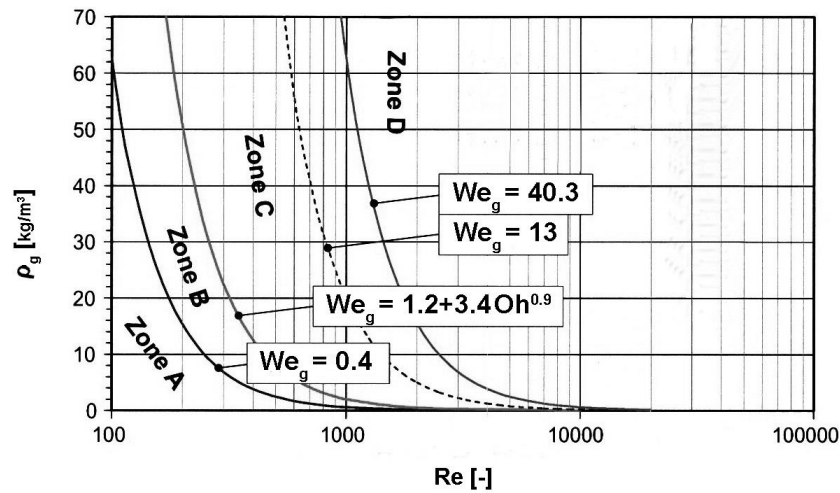


Figura 2.2: Regimes de desintegração primária de líquidos em função do número de Reynolds e da densidade do meio gasoso [9].

É possível exibir os regimes de desintegração em função de todas as três variáveis, como representado na Figura 2.3 [7].

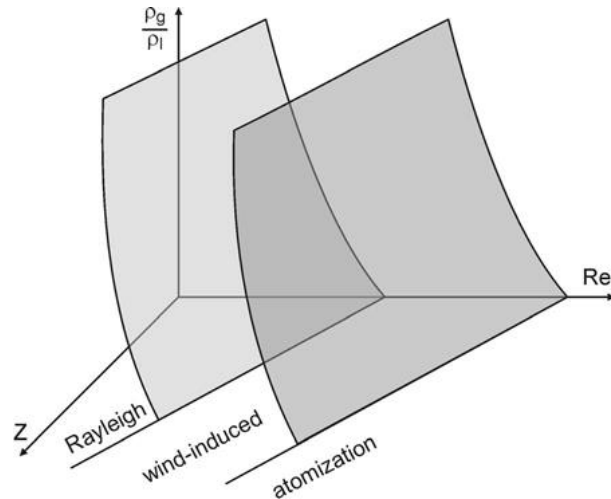


Figura 2.3: Regimes de desintegração primária de líquidos em função dos números de Reynolds e Ohnesorge, e da densidade do meio gasoso [7].

Fica claro, a partir das figuras anteriores, que as características dos sistemas de injeção Diesel actuais colocam os processos que se pretendem estudar, bem dentro do regime de atomização.

Com o aumento do número de Weber do meio gasoso (ou no caso da densidade do meio ser constante, da velocidade de injeção), é possível fazer a distinção entre quatro regimes básicos de desintegração primária. Estes regimes são discutidos de seguida, representados na Figura 2.4 [9] e estão também mencionados nos gráficos das figuras anteriores.

A. Desintegração de Rayleigh - A velocidades de injeção baixas, apenas a tensão superficial tem um impacto significativo sobre as características de desintegração. Promove contracções, mas por outro lado impede o alargamento da coluna de líquido quando este se desloca a partir das secções vizinhas contraídas. Assim, as perturbações mais pequenas levam a oscilações axi-simétricas, donde resulta o efeito de desintegração da coluna de líquido. As gotas resultantes têm diâmetros maiores que o jacto original [10].

B. Primeiro regime de desintegração de vento induzido – Com o aumento do número de Weber (ou aumento da velocidade de injeção, caso outras variáveis se mantenham constantes), as forças aerodinâmicas exercidas sobre a superfície da coluna de líquido ganham influência. A distribuição de pressão resultante do escoamento em torno das perturbações superficiais contribuem para a desintegração. De acordo com Lefebvre [1], as gotas resultantes têm aproximadamente o mesmo diâmetro que o jacto original.

C. Segundo regime de desintegração de vento induzido – Com um maior aumento do número de Weber, o processo anterior continua a decorrer, mas em maior extensão e mais rapidamente, proporcionando gotas ligeiramente menores que o diâmetro do jacto original.

D. Atomização – Acima de um determinado valor do número de Weber, o jacto de líquido começa imediatamente a desintegrar-se ao longo de toda a sua secção transversal, logo à saída do orifício do atomizador. Isto significa que a coluna de líquido, simétrica e sem

perturbações, comum aos três regimes de desintegração anteriores numa extensão decrescente com o aumento do número de Weber, está ausente neste regime, ou existe com um comprimento muito curto. As forças aerodinâmicas e as forças decorrentes da turbulência e cavitação no atomizador afectam a fase inicial deste regime de desintegração.

A desintegração inicialmente só afecta a superfície exterior do volume de líquido injectado, e existe ainda um núcleo líquido no interior do escoamento. No entanto, este núcleo não é visível devido à presença de pequenas gotas em torno dele, imediatamente após a saída do atomizador.

O processo de desintegração primária, nas condições de funcionamento típicas dos motores Diesel, apresenta este regime de desintegração devido a meios gasosos muito densos, elevados números de Weber e velocidades de injeção elevada.

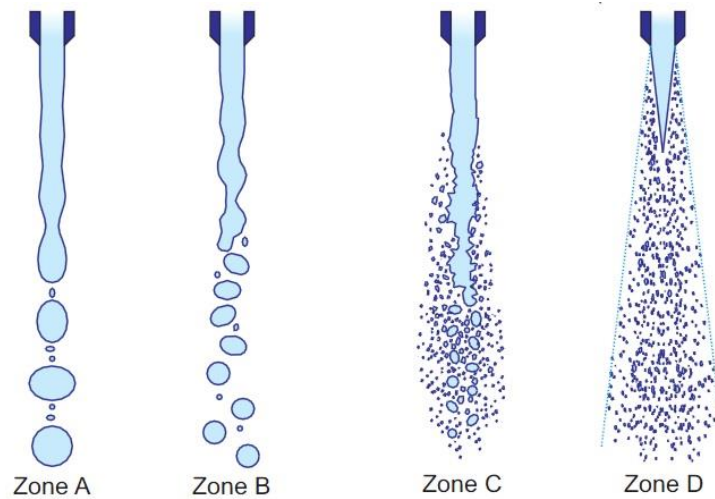


Figura 2.4: Imagem típica dos quatro regimes de desintegração primária [9].

Uma clara tendência de dar destaque à desintegração primária (e portanto aos efeitos do escoamento no interior do atomizador) evoluiu na literatura. Em 1989, Lefebvre constatou no seu reconhecido livro *Atomization and Sprays* [1], que na época era consenso geral considerar como principal causa de atomização a acção do meio gasoso circundante, enquanto a turbulência do jacto (e cavitação) era considerada apenas um factor contribuinte, que tornava a superfície do líquido mais susceptível aos efeitos aerodinâmicos. Desde aquela altura, a tecnologia de medição evoluiu de forma considerável (e também as pressões de injeção), e o consenso geral foi alterado: o efeito do escoamento no atomizador considera-se como sendo pelo menos tão importante como os efeitos aerodinâmicos nos processos de desintegração subsequentes.

O trabalho de Gulder [11] enfatiza o papel da cavitação e da turbulência do líquido, no processo completo de desintegração de jactos Diesel a tal ponto que chega mesmo a considerar que o processo de desintegração secundária (discutido na próxima secção), desempenha um papel pouco importante na atomização. Também de acordo com Bianchi *et al.* [12], o papel das

forças aerodinâmicas é negligenciável na desintegração inicial do jacto de líquido, visto que a turbulência do líquido é a principal causa da mesma.

Esta mudança na abordagem ocorreu em simultâneo à grande era de desenvolvimento que os sistemas de injeção Diesel experimentaram. Por consequência, a contribuição das características dos atomizadores para o processo de desintegração não foi apenas reconhecido, como com o rápido aumento das pressões de injeção se tornou mais importante.

2.1.3 Desintegração Secundária

O processo de desintegração primária, atrás referido, separa gotas a partir do núcleo líquido. No entanto, estas gotas são instáveis e, conseqüentemente, estão sujeitas a uma ruptura adicional. Este processo de separação subsequente é geralmente referido como desintegração secundária.

A importância da desintegração secundária acentua-se no caso típico de sistemas de propulsão e geração de energia, em que devido às condições de operação (normalmente temperatura elevada do meio gasoso), a tensão superficial das gotas torna-se muito reduzida e portanto, o potencial de efeitos significativos de deformação das gotas torna-se elevado [13].

A desintegração secundária ocorre principalmente através de forças aerodinâmicas, como tal, a velocidade relativa da gota e o meio gasoso ambiente desempenham um papel importante no processo. Consoante o aumento da velocidade relativa (ou o aumento do número de Weber devido a factores já referenciados), os regimes de desintegração secundária são delineados como ilustra a Figura 2.5 [7]. A existência destes regimes foi confirmada por diversos estudos, como por exemplo o de Wierzbna [14].

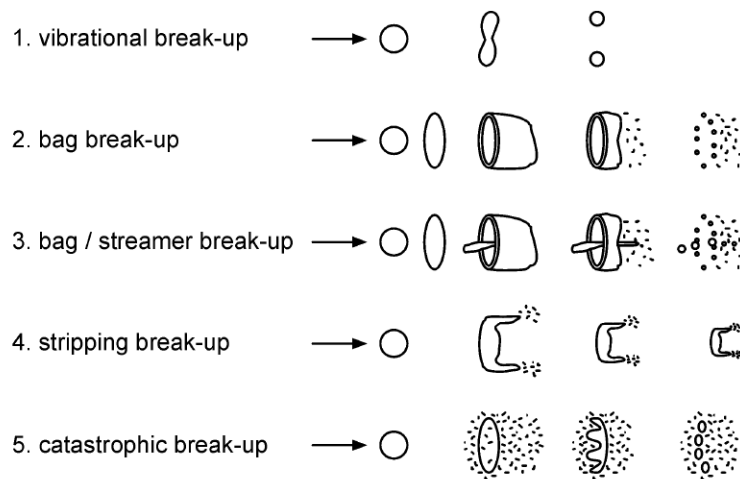


Figura 2.5: Regimes de desintegração secundária em função do aumento do número de Weber [7].

1. Quando o número de Weber é baixo, a oscilação da gota é ligeiramente amplificada, o que a conduz a uma lenta decomposição em alguns fragmentos. Este fenómeno

designa-se por desintegração vibratória, “*vibrational breakup*” na literatura inglesa. O tempo de desintegração é grande em comparação com todos os outros processos.

2. No caso de uma desintegração tipo “saco”, “*bag breakup*” na literatura inglesa, a gota inicialmente adquire a forma de um disco perpendicular à direcção do escoamento, então o centro deste disco começa a formar uma estrutura tipo balão. Posteriormente, este balão desintegra-se em gotas mais pequenas e pouco depois o anel circundante desintegra-se num menor número de gotas um pouco maiores.

3. Com um aumento ainda maior do número de Weber ocorre a desintegração tipo “guarda-chuva”, “*streamer breakup*” na literatura inglesa. Esta é semelhante à desintegração anterior, mas para além da estrutura de balão, também surge uma coluna de líquido paralela à direcção do escoamento, que se desintegra ao mesmo tempo que o anel circundante.

4. A velocidades relativas elevadas pode ser observada a desintegração por camadas, “*stripping breakup*” da literatura inglesa. Neste processo, a gota adquire o formato de disco, semelhante ao da desintegração tipo “saco”, começa a desintegrar-se, mas na periferia e não no centro. A camada arrancada desintegra-se logo, e uma gota residual é sempre observável durante todo o processo de desintegração.

5. Com um maior aumento da velocidade relativa, a atomização rege-se por dois tipos de instabilidade superficial. Primeiro, formam-se à superfície ondas de pequeno comprimento de onda, mas de grande amplitude, paralelas à direcção do escoamento. Este fenómeno designa-se por instabilidades de Kelvin-Helmholtz e conduz à redução constante do diâmetro da gota. Uma pequena perturbação inicial da superfície entre dois fluxos paralelos conduz a uma diferença de pressão. Esta diferença de pressão amplifica a perturbação inicial, enquanto o processo é amortecido pela tensão superficial. Quando o crescimento desta onda atinge um ponto crítico, uma porção de líquido separa-se, ou seja, ocorre desintegração.

Caso as ondas superficiais de pequeno comprimento de onda, mas de grande amplitude, surjam na frente da gota, esta rapidamente se desintegra em vários fragmentos de grandes dimensões. Estes fragmentos são então sujeitos a uma desintegração adicional. Este fenómeno designa-se por instabilidades de Rayleigh-Taylor e conduz à chamada desintegração catastrófica, “*catastrophic breakup*” da literatura inglesa. As instabilidades de Kelvin-Helmholtz e Rayleigh-Taylor estão representadas na Figura 2.6 [15].

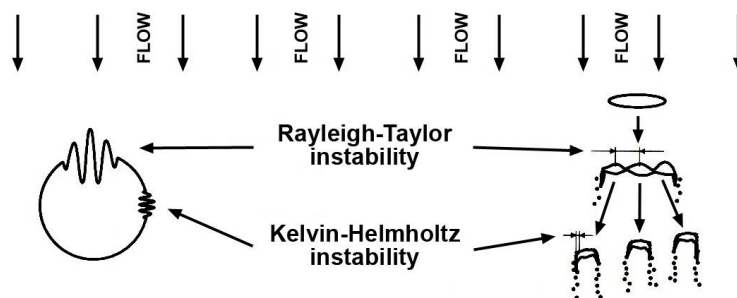


Figura 2.6: Fenómenos físicos que conduzem ao regime de desintegração catastrófica [15].

Se as instabilidades de Rayleigh-Taylor não desempenharem um papel dominante a redução do diâmetro da gota é contínua em vez de repentina.

Uma vez que um número de Weber elevado é geralmente atingido nas condições de funcionamento de um motor Diesel, estas instabilidades atribuídas ao regime de desintegração catastrófica são importantes. No entanto, no início e no fim da injeção, as velocidades relativas são muito menores do que no entretanto, como tal, os processos de desintegração para um menor número de Weber também têm de ser considerados. Outra das razões, é que devido à interacção com o meio gasoso, há zonas na nuvem de gotas em que a velocidade relativa é significativamente menor do que o valor médio.

2.1.4 Estrutura do Jacto

Como resultado dos fenómenos acima descritos, a atomização típica de um motor Diesel, possui três zonas características, conforme representado na Figura 2.7 [13].

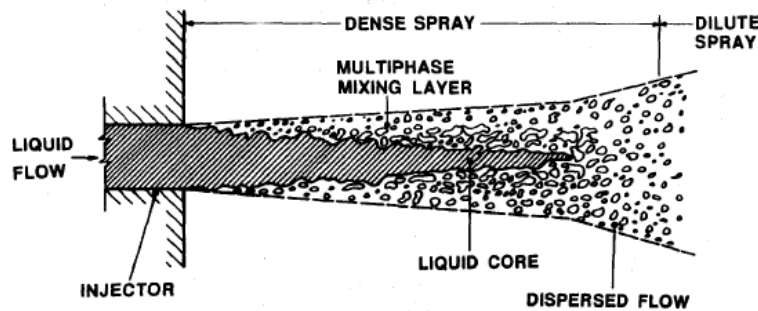


Figura 2.7: Zonas características da atomização [13].

O núcleo líquido, “*liquid core*” na literatura inglesa, é composto por fluido não atomizado. Dependendo da definição, pode significar um núcleo completamente intacto (isto é, uma coluna de líquido), ou a zona da nuvem de gotas onde a desintegração não é concluída totalmente. Depois encontra-se a zona muitas vezes referida como camada de mistura de fases, “*multiphase mixing layer*” na literatura inglesa. A esta zona segue-se um escoamento disperso, onde as gotas (fase dispersa) se movem individualmente no meio gasoso (fase gasosa).

De acordo com o trabalho de Chaves *et al.* [16], realizado em condições similares às de funcionamento dos motores Diesel (elevada densidade do meio gasoso e velocidade de injeção alta), pode ser detectada a presença de um núcleo denso mesmo a distâncias de cerca de cem vezes o diâmetro do atomizador, a jusante deste.

No entanto, a pesquisa demonstrou que a teoria de uma coluna central na nuvem de gotas, contendo a maioria das parcelas atomizadas de forma incompleta, é válida apenas até alguns diâmetros de distância do atomizador, no início da injeção. Mais a jusante foi detectada apenas a presença de estruturas de líquido, constituídas por películas e ligamentos interligados.

Não aceitando estas estruturas como parte do núcleo líquido, outros investigadores indicam que sob as condições de funcionamento de um motor Diesel, o comprimento do núcleo

líquido (definido como núcleo intacto) é apenas poucas vezes o diâmetro do atomizador [11]. Estas investigações consideram que o líquido é maioritariamente atomizado imediatamente após a saída do atomizador.

De acordo com Salters [17], a desintegração do núcleo líquido pode-se considerar concluída a uma distância de cerca de cem vezes o diâmetro do atomizador, desde a saída do injector. Nas suas experiências, apenas 1% do líquido injectado medido se considera atomizado de forma incompleta, a esta distância.

2.1.5 Atomizadores

Para muitas aplicações, o objectivo dos sistemas de injeção é maximizar a superfície entre o líquido e o meio circundante, de forma a melhorar os processos de transferência de calor e/ou massa.

Para qualquer atomizador, a dimensão média das gotas e a distribuição do tamanho destas na atomização, são em grande parte dependentes do seu tamanho, das características geométricas, das condições de operação, das propriedades físicas do líquido injectado e do meio gasoso. A ampla gama de aplicação de nuvens de gotas motivou o desenvolvimento de uma larga variedade de dispositivos de atomização. Os diferentes modelos estão focados nas exigências específicas, tais como a uniformidade e os padrões da nuvem, não ocorrência de entupimentos, menores consumos de energia, peso, etc. Um atomizador deve possuir os seguintes recursos:

- i. Capacidade de proporcionar boa atomização para uma vasta gama de caudais,
- ii. Resposta rápida a alterações de caudal,
- iii. Baixo consumo de energia,
- iv. Baixo custo, facilidade de fabrico e de remoção para manutenção,
- v. Baixa susceptibilidade a danos durante o fabrico e instalação.

Ao usar combustíveis como líquido a ser injectado, os atomizadores também devem ter baixa susceptibilidade ao bloqueio por resíduos e fornecer uma distribuição de combustível uniforme, circunferencial e radialmente.

Como ilustrado na Figura 2.8, Lefebvre [1] classificou os tipos mais comuns de atomizadores em três categorias: de pressão ou hidráulicos, rotativos, e de dois fluidos ou pneumáticos. Nos últimos anos, muitos outros dispositivos de atomização foram desenvolvidos para aplicações especiais, tais como os electrostáticos, os sónicos, etc. O diagrama da Figura 2.9 [10] também apresenta sucintamente alguns tipos de atomizadores existentes.

Uma ampla informação das principais características e dos méritos relativos de tais atomizadores são fornecidos nos livros de Lefebvre [1], Bayvel e Orzechowski [18], Liu [19] e Ashgriz [20].

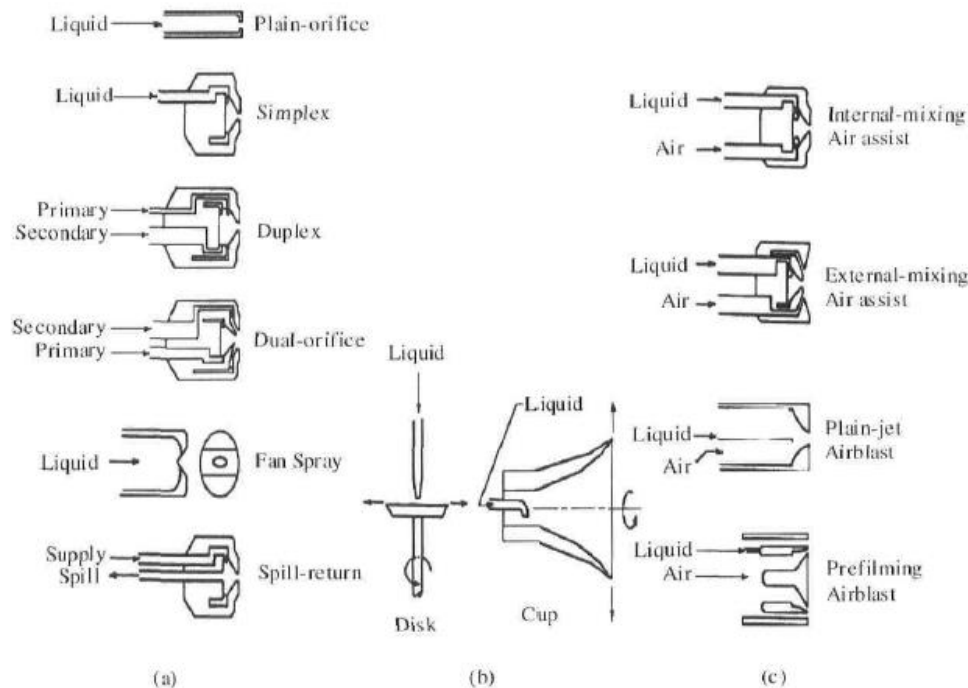


Figura 2.8: (a) Atomizadores de Pressão; (b) Atomizadores Rotativos; (c) Atomizadores de Dois Fluidos [1].

2.1.5.1 Atomizadores de Pressão ou Hidráulicos

A categoria dos atomizadores de pressão inclui os de orifício plano, modelo estudado na presente dissertação. Este tipo de atomizador utiliza a energia do fluido, a uma pressão mais alta, para conferir uma elevada velocidade relativa entre o líquido e o meio gasoso ambiente. Estes atomizadores geralmente requerem pressões de injeção muito mais elevadas do que os de dois fluidos para conseguir uma qualidade de atomização adequada.

2.1.5.1.1 Atomizadores de Orifício Plano

O atomizador de orifício plano, ilustrado na figura 2.8 [1], é o modelo estudado na presente dissertação. Neste, recorre-se a um orifício circular simples para injectar líquido no meio gasoso. Alcança-se uma melhor atomização com orifícios pequenos, mas devido à dificuldade de manter os líquidos livres de partículas estranhas, normalmente limita-se o diâmetro mínimo do orifício a cerca de 0,3 milímetros.

Este tipo de atomizador tem muitas aplicações, devido à sua simplicidade e facilidade de fabrico. As aplicações incluem desde mangueiras de jardim a sistemas de injeção Diesel.

2.1.5.2 Atomizadores Rotativos

Nos atomizadores rotativos, introduz-se o fluido no centro de um elemento de rotação que lhe confere algum momento angular. Estes atomizadores têm a vantagem de permitir um controlo independente da qualidade da atomização e da velocidade de injeção.

2.1.5.3 Atomizadores de Dois Fluidos ou Pneumáticos

Neste tipo de atomizador, usa-se um fluxo de ar ou de gás para melhorar a atomização do líquido. Os exemplos típicos incluem os injectores para motores de turbina de gás. Estes atomizadores podem ser de mistura interna ou externa, dependendo se o líquido e o fluxo de ar ou gás são misturados dentro ou fora do seu corpo. As vantagens deste tipo de atomizadores são a possibilidade de ser utilizados com fluidos de alta viscosidade e operar a pressões mais baixas do que os atomizadores de pressão. Além disso, os fluxos de líquido e de ar ou gás podem ser controlados de forma independente.

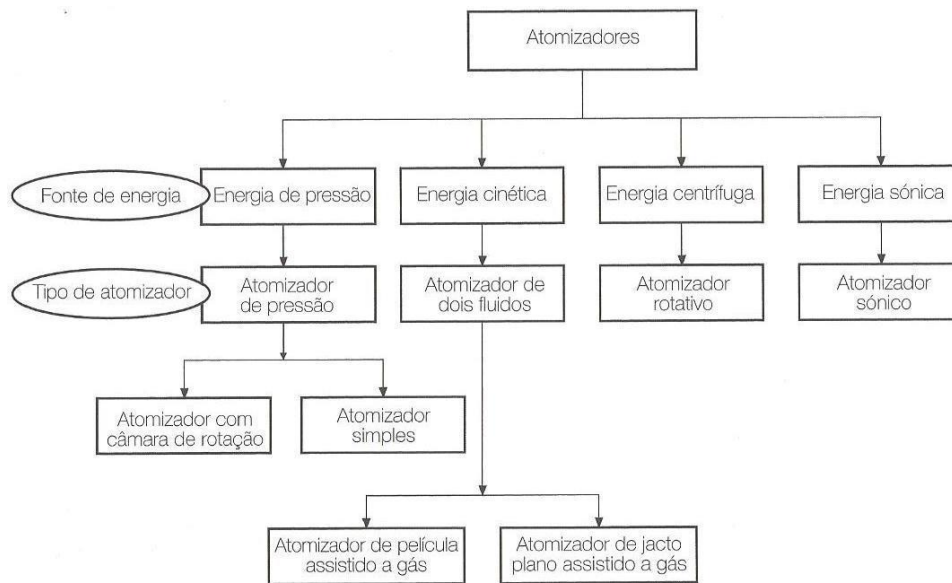


Figura 2.9: Tipos de Atomizadores [10].

2.2 Resultados de Caracterização de Nuvens de Gotas

O desempenho de qualquer tipo de atomizador depende das propriedades físicas da fase dispersa (o líquido a ser atomizado) e da fase contínua (o meio gasoso dentro do qual as gotas são injectadas). Enquanto as características mais importantes da atomização são o comprimento de desintegração, o formato global da nuvem, quantificado pelo ângulo da nuvem de gotas, a penetração da nuvem de gotas (e a sua evolução temporal), o tamanho médio de gotas (caracterizado pelo *SMD*). Estas características são cruciais, uma vez que a validação de vários modelos foi realizada com base em algumas delas.

Esta secção começa por abordar as propriedades físicas com influência na atomização, para depois apresentar as características mais importantes das nuvens de gotas.

2.2.1 Propriedades dos Líquidos

As características de escoamento e de atomização dos atomizadores são influenciadas pelas propriedades dos líquidos: densidade, viscosidade e tensão superficial. Em teoria, o caudal

mássico através de um atomizador de pressão varia de acordo com a raiz quadrada da densidade do líquido. No entanto, na prática, como Tate [21] apontou, raramente é possível alterar a densidade sem afectar alguma outra propriedade, logo esta relação deve ser interpretada com cautela.

A importância da densidade para o desempenho da atomização diminui pelo facto de a maioria dos líquidos apresentar pequenas diferenças nesta propriedade. Além disso, a pequena quantidade de dados disponíveis sobre o efeito da densidade do líquido no tamanho médio de gota indica que a sua influência é muito pequena, como apresentado na Figura 2.10 [22].

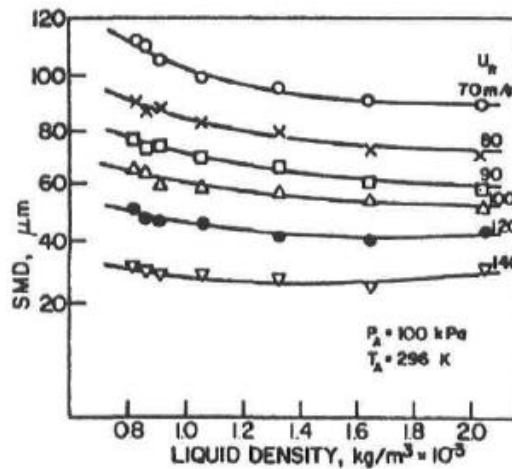


Figura 2.10: Variação do SMD com a densidade do líquido [22].

Uma maneira de definir uma nuvem de gotas é em função do aumento da área superficial de líquido resultante da atomização. A área superficial antes da desintegração é, simplesmente, a coluna de líquido que emerge do atomizador, mas após a atomização, é a soma das áreas de superfície de todas as gotas individuais. Este factor fornece uma indicação directa do grau de atomização obtido e é útil em aplicações que enfatizam fenómenos superficiais, tais como a evaporação. A tensão superficial é importante na atomização porque representa a força que resiste à formação de novas superfícies.

Os valores de tensão superficial mais comuns vão desde 0,073 kg/s² para a água até 0,3 kg/s² para alguns produtos petrolíferos [10]. Nos líquidos mais puros em contacto com o ar, a tensão superficial diminui com o aumento da temperatura [23]. O aumento da tensão superficial resulta em gotas de maiores dimensões, como se pode verificar na Figura 2.11 [22].

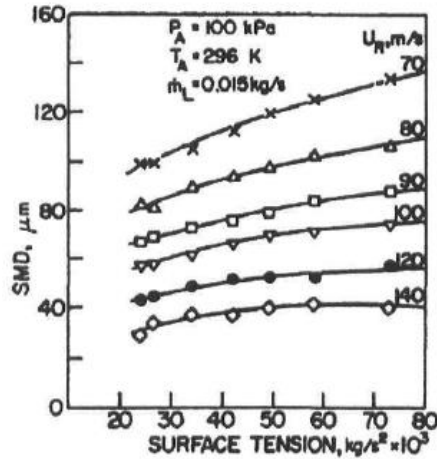


Figura 2.11: Variação do SMD com a tensão superficial do líquido [22].

Em muitos aspectos, a viscosidade é a propriedade mais importante dos líquidos. Embora num sentido absoluto a sua influência sobre a atomização não seja maior que a da tensão superficial, a sua importância deriva do facto de afectar não só a distribuição do tamanho de gotas da nuvem, mas também o seu formato e o caudal escoado pelo atomizador. O aumento da viscosidade reduz o número de Reynolds e também impede o desenvolvimento de instabilidades naturais no jacto. O efeito combinado é o de atrasar a desintegração e aumentar o tamanho das gotas na atomização.

O efeito da viscosidade sobre o caudal no interior do atomizador é complexo. Em atomizadores de jacto oco, “*hollow-cone*” na literatura inglesa, um modesto aumento na viscosidade pode realmente aumentar o caudal escoado, no entanto, a altas viscosidades o caudal diminui proporcionalmente ao aumento da viscosidade, como acontece com a maioria dos atomizadores. O aumento da viscosidade do líquido, invariavelmente, tem um efeito adverso na qualidade da atomização, porque quando as perdas viscosas são grandes, há menos energia disponível para a atomização e resulta uma atomização grosseira, como se apresenta na Figura 2.12 [22].

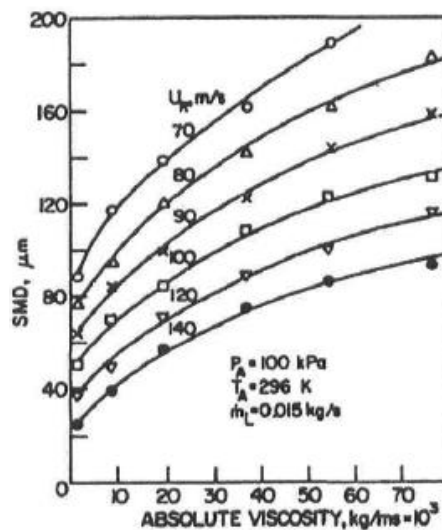


Figura 2.12: Variação do SMD com a viscosidade do líquido [22].

A viscosidade dos líquidos varia de 0,001 kg/(m.s) para a água, a 0,6 kg/(m.s) para o fuelóleo pesado. A Tabela 2.1 (adaptada de [10]) lista as propriedades físicas relevantes de alguns combustíveis líquidos. A viscosidade dos líquidos geralmente diminui com o aumento da temperatura e é habitual aquecer muitos fuelóleos mais pesados, em parte para reduzir os requisitos energéticos de bombagem, mas também para melhorar a atomização.

Tabela 2.1: Propriedades de alguns combustíveis líquidos (adaptado de [10]).

Combustível	Temperatura [K]	Densidade [kg/m ³]	Tensão Superficial [N/m]	Viscosidade Dinâmica [N.s/m ²]
Diesel	298	827	0,0285	0,0026
Fuelóleo Leve		921	0,0327	0,1013
Fuelóleo Intermédio		939	0,0336	0,3099
Fuelóleo Pesado		952	0,0343	0,9996

2.2.2 Condições Ambientais

O meio gasoso onde se efectua a injeção pode variar amplamente, em pressão e temperatura. Isto verifica-se especialmente nos sistemas de combustão alimentados por combustíveis líquidos. Nos motores Diesel são encontradas condições críticas de temperatura e pressão, nas câmaras de combustão de turbinas a gás os combustíveis são injectados num meio altamente turbulento e nas fornalhas industriais o combustível é pulverizado sobre as chamas de alta temperatura dos produtos da combustão.

Nos atomizadores de orifício plano, um aumento na densidade do meio gasoso conduz a um ângulo de nuvem de gotas maior. Isto porque o aumento da resistência aerodinâmica sobre as gotas, originado pelo aumento na densidade do meio, tende a produzir uma maior desaceleração na direcção axial do que na direcção radial.

Estudos realizados por De Corso [24], Neya e Sato [25] e Rizk e Lefebvre [26], investigaram a influência da pressão ambiente sobre as características da atomização e concluíram que o aumento da densidade do meio, não só reduz o ângulo da nuvem de gotas como também aumenta a dimensão média destas, tendo considerado que a coalescência entre gotas era responsável por esse aumento.

Posteriormente, um estudo realizado por Wang e Lefebvre [27], revelou um aumento inicial do diâmetro médio da gota com o aumento da pressão do meio gasoso até um máximo de cerca de 0,4 MPa, para além da qual qualquer aumento adicional da pressão causa a redução do *SMD*, como apresentado na Figura 2.13 [27].

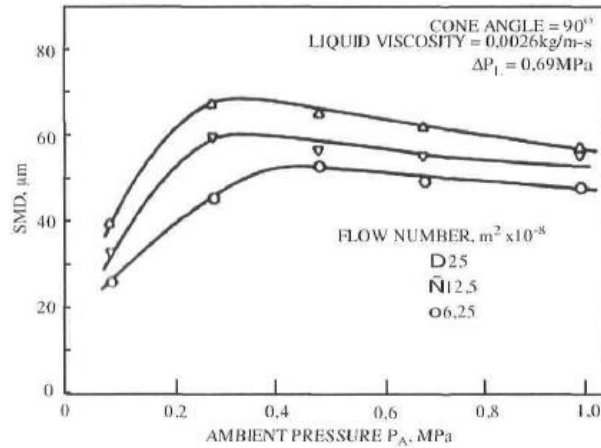


Figura 2.13: Influência da pressão do meio gasoso no SMD [27].

2.2.3 Comprimento de Desintegração

O comprimento de desintegração caracteriza o ponto de descontinuidade, onde a atomização evolui de um núcleo denso de líquido para um regime de gotas finamente atomizadas.

Shimizu *et al.* [28] mediram o comprimento de desintegração através de uma resistência eléctrica entre o atomizador e uma rede de arame fino localizado no interior do jacto. Os investigadores verificaram que o comprimento de desintegração diminui com o aumento da velocidade de injeção, alcançando por fim um valor constante.

A mesma técnica foi aplicada por Hiroyasu e Arai [29], para os efeitos da velocidade de injeção, pressão ambiente e geometria do atomizador. As figuras seguintes mostram os efeitos destes parâmetros sobre o comprimento de desintegração, onde se verifica que o líquido injectado não se desintegra imediatamente após a saída do atomizador.

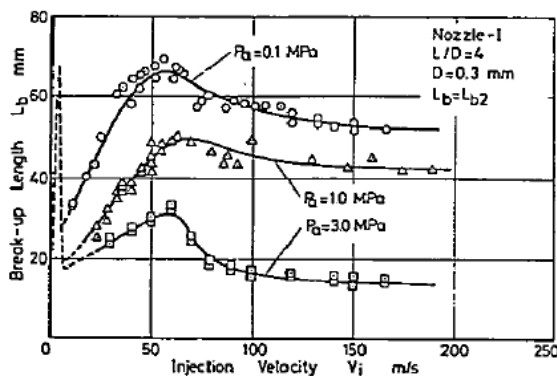


Figura 2.14: Influência da velocidade de injeção no comprimento de desintegração [29].

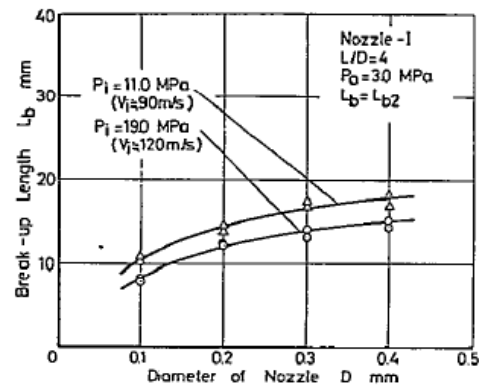


Figura 2.15: Influência do diâmetro do atomizador no comprimento de desintegração [29].

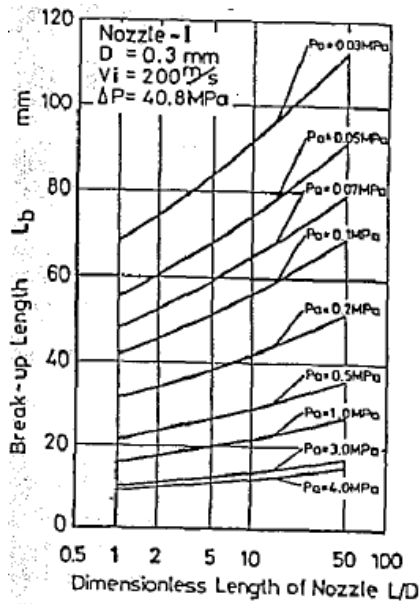


Figura 2.16: Influência da razão L/d do atomizador no comprimento de desintegração [29].

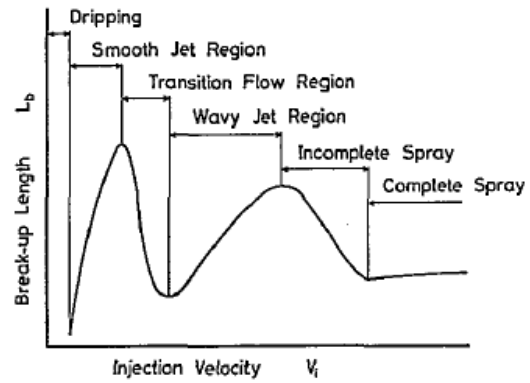


Figura 2.17: Comportamento de desintegração de um jacto de líquido [29].

Os autores verificaram que o comprimento de desintegração é inversamente proporcional à pressão ambiente, mas a sua dependência da velocidade de injeção é mais complicada. Os processos de desintegração e a quantidade de movimento contribuem para determinar o comprimento de desintegração, resultando numa dependência não linear da velocidade de injeção, como se pode observar na Figura 2.17 [29].

2.2.4 Ângulo da Nuvem de Gotas

É definido como o ângulo formado por duas linhas rectas traçadas da ponta do injectore para a periferia exterior da nuvem de gotas, a uma distância de sessenta vezes o diâmetro do atomizador, a jusante deste [30].

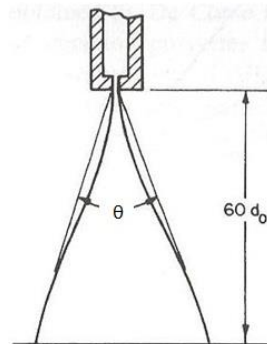


Figura 2.18: Definição de ângulo da nuvem de gotas Diesel [30].

O ângulo da nuvem de gotas é um indicador qualitativo de quão bem esta se dispersa, sendo influenciado pela geometria do atomizador, as propriedades dos líquidos e a densidade do meio gasoso em que o líquido é injectado.

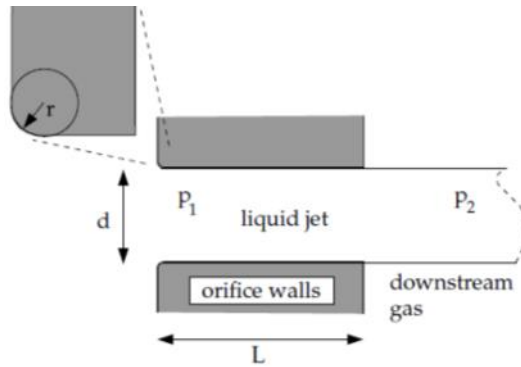


Figura 2.19: Características geométricas do atomizador de orifício plano [31].

A influência da razão L/d da geometria do atomizador foi analisada por diversos investigadores. Shimizu *et al.* [28] mostraram que uma razão L/d de cerca de 4 ou 5 origina o ângulo máximo e um menor comprimento de desintegração. Aumentar a razão origina um menor ângulo e reduzi-la resulta num maior comprimento de desintegração.

Os efeitos da viscosidade cinemática e da pressão de injeção foram estudados por Hiroyasu e Arai [29], que verificaram o aumento do ângulo da nuvem com a redução da viscosidade do líquido e o aumento da pressão de injeção, antes de estabilizar após atingir um valor máximo, conforme se pode observar na Figura 2.19 [29].

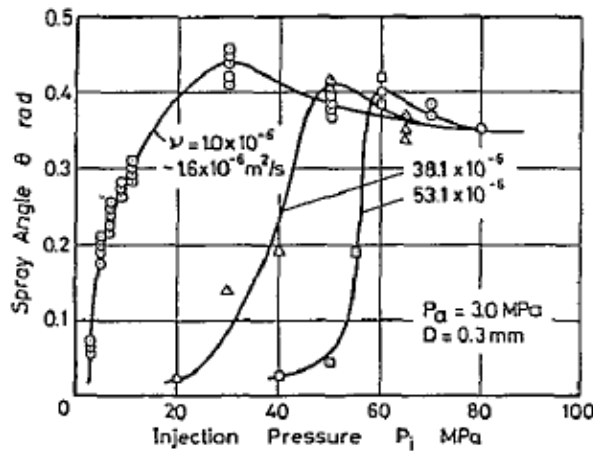


Figura 2.20: Influência da viscosidade cinemática e da pressão de injeção no ângulo da nuvem de gotas [29].

2.2.5 Diâmetro de Gotas e Distribuição do Tamanho de Gotas

As gotas não surgem num tamanho uniforme em toda a nuvem devido à grande variedade de processos de atomização, interações entre as próprias gotas e à sua natureza heterogênea [1]. Em vez disso, as gotas tendem a apresentar-se distribuídas por tamanho, em torno de alguns valores médios.

2.2.5.1 Definição de Diâmetros Médios

A atomização descreve-se frequentemente através do diâmetro médio das gotas. Os diâmetros médios são calculados utilizando a relação geral proposta por Mugele e Evans [32], apresentada na Equação (2.5) e encontram-se resumidos na Tabela 2.3 (adaptada de [1]).

$$d_{ab} = \left(\frac{\sum_{i=0}^N N_i d_i^a}{\sum_{i=0}^N N_i d_i^b} \right)^{\frac{1}{a-b}}, \quad (2.5)$$

onde d_i é o diâmetro representativo da classe i , N_i é o número de gotas na classe i , e a e b são números inteiros. O diâmetro médio mais utilizado no estudo da atomização é o *SMD*, que representa o diâmetro de uma gota com a mesma proporção volume/superfície que a totalidade da nuvem de gotas. Quanto menor for o *SMD*, mais finas são as gotas, o que significa uma melhor atomização.

Tabela 2.2: Diâmetros médios de gota e respectivas aplicações (adaptado de [1]).

a	b	Nome do diâmetro médio	Símbolo	Expressão	Aplicação
1	0	Linear	d_{10}	$\frac{\sum N_i d_i}{\sum N_i}$	Comparações
2	0	Superfície	d_{20}	$\left(\frac{\sum N_i d_i^2}{\sum N_i} \right)^{\frac{1}{2}}$	Controlo da Área Superficial
3	0	Volume	d_{30}	$\left(\frac{\sum N_i d_i^3}{\sum N_i} \right)^{\frac{1}{3}}$	Controlo do Volume
2	1	Superficial	d_{21}	$\frac{\sum N_i d_i^2}{\sum N_i d_i}$	Absorção
3	1	Volumétrico	d_{31}	$\left(\frac{\sum N_i d_i^3}{\sum N_i} \right)^{\frac{1}{2}}$	Evaporação
3	2	Sauter (<i>SMD</i>)	d_{32}	$\frac{\sum N_i d_i^3}{\sum N_i d_i^2}$	Vaporização
4	3	De Brouckere ou Herdan	d_{43}	$\frac{\sum N_i d_i^4}{\sum N_i d_i^3}$	Combustão

2.2.5.2 Distribuição do Tamanho de Gotas

Embora as nuvens de gotas sejam geralmente caracterizadas pelo seu diâmetro médio de gotas, este valor pode variar muito, dependendo da localização e do tempo de medição [33], [34]. Além de que é possível medir duas nuvens diferentes com o mesmo *SMD*. Assim, é mais correcto, apesar de mais trabalhoso e complexo, descrever as nuvens de gotas pela sua

distribuição local do tamanho de gotas. A informação do tamanho de gotas apresenta-se muitas vezes como um histograma, com o número de gotas para um dado tamanho.

Com o intuito de simplificar a descrição da distribuição do tamanho de gotas, vários investigadores têm tentado substituir os dados dimensionais da gota com expressões matemáticas, definidas por um ou mais parâmetros. Existem várias funções utilizadas para representar a distribuição de gotas, tanto por tamanho como por velocidade, entre as quais a distribuição normal e a distribuição log-normal. Uma grande variedade de funções empíricas também têm sido desenvolvidas para caracterizar a distribuição do tamanho de gotas, das quais se destacam as de Rosin – Rammler e Nukiyama – Tanasawa [1].

2.2.5.3 Influência dos Parâmetros de Injecção

A influência de parâmetros de injecção como, a geometria do atomizador, a pressão de injecção, as condições ambientais e as propriedades do combustível, sobre a distribuição do tamanho de gotas foi estudada por vários investigadores [29], [33], [35]. Também Vaz [36] estudou numa caldeira laboratorial o efeito de *co-swirl* e *counter-swirl* na qualidade de combustão do combustível Diesel.

Hiroyasu e Arai [29] estudaram a variação do *SMD* com as pressões de injecção e do meio gasoso, a geometria do atomizador e a viscosidade dos líquidos. Verificaram que para a atomização ter uma distribuição de gotas finas, existe um limite superior para a viscosidade do fluido e também um limite inferior para a pressão de injecção. Para vários valores de pressão de injecção, o *SMD* foi minimizado por uma razão geométrica de $L/d = 4$ e para pressões de injecção mais elevadas, o *SMD* parece depender pouco da pressão ambiente. Líquidos com viscosidade mais elevada também resultaram num *SMD* mais elevado.

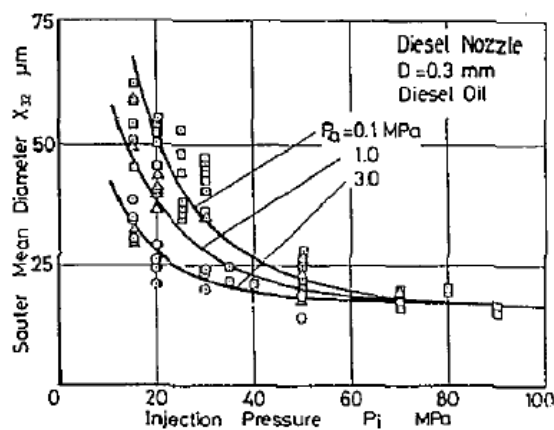


Figura 2.21: Influência da pressão de injecção no *SMD* [29].

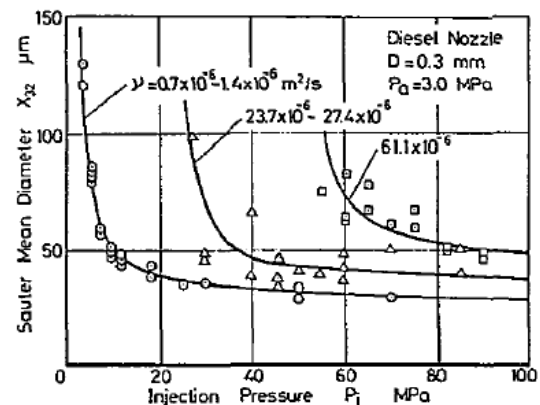


Figura 2.22: Influência da viscosidade e da pressão de injecção no *SMD* [29].

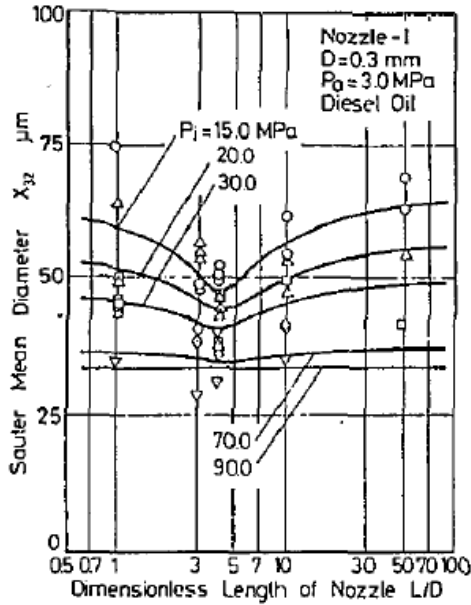


Figura 2.23: Influência da razão L/d no SMD [29].

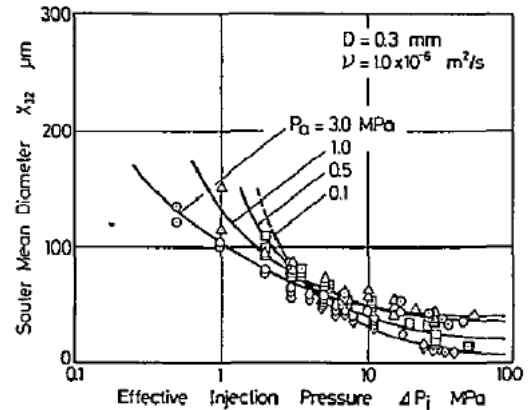


Figura 2.24: Influência da pressão ambiente no SMD [29].

O SMD depende não só dos parâmetros físicos da injeção, mas também do tempo e do local dentro da nuvem de gotas. Hiroyasu e Kadota [33] analisaram a variação do SMD recolhendo amostras locais. Considerando a distância radial a partir do eixo da nuvem, descobriram que as gotas eram pequenas nas extremidades e grandes ao longo do eixo, situação ilustrada na Figura 2.17 [33]. Considerando a distância axial, foram encontradas gotas maiores perto do atomizador e mais pequenas a jusante deste.

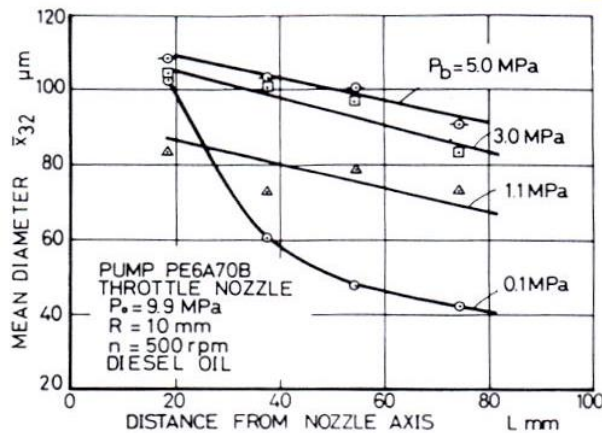


Figura 2.25: SMD em vários locais de amostragem [33].

Convém salientar que o SMD desempenha um papel importante no desempenho termodinâmico e no nível de emissões poluentes, como apresentado nas Figuras 2.26 a 2.29 [6].

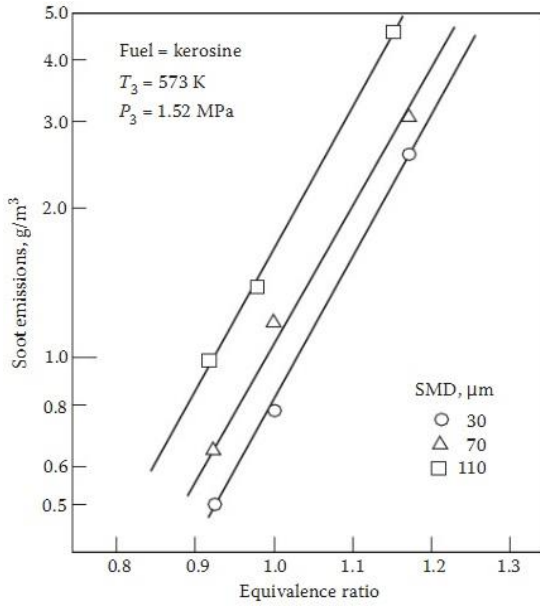


Figura 2.26: Influência do SMD na formação de resíduos de combustão [6].

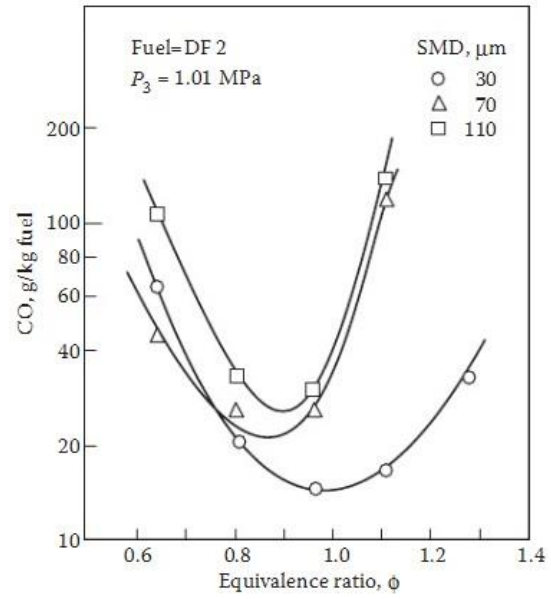


Figura 2.27: Influência da atomização do combustível nas emissões de CO [6].

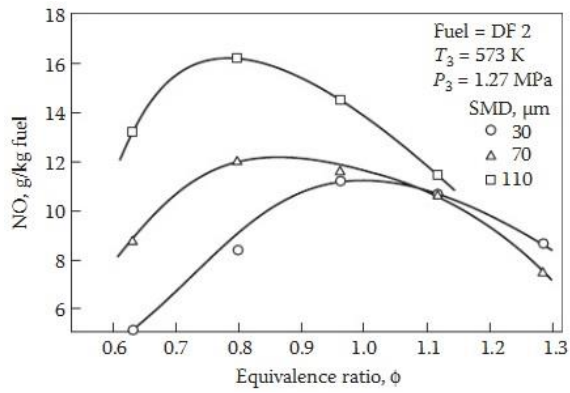


Figura 2.28: Influência da atomização do combustível nas emissões de NO [6].

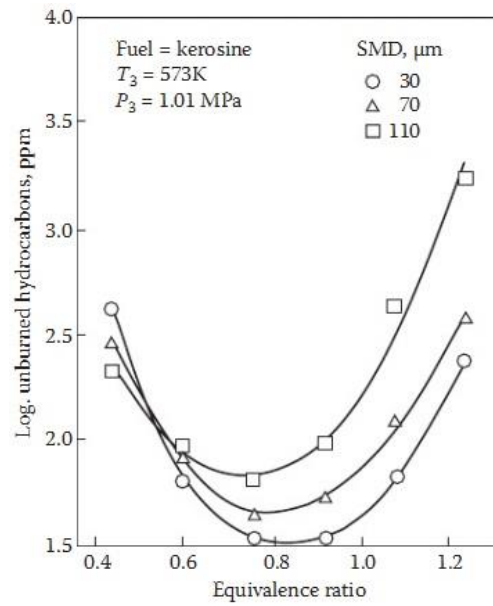


Figura 2.29: Influência da atomização do combustível nas emissões de UHC [6].

Capítulo 3

Aplicação de Relações Empíricas da Literatura

A nuvem de gotas pode ser, grosso modo, descrita pelos parâmetros apresentados na Figura 3.1 [29]: comprimento de desintegração (“*breakup length*” na literatura inglesa), ângulo de nuvem de gotas (“*spray angle*” na literatura inglesa), penetração da nuvem de gotas (“*spray tip penetration*” na literatura inglesa) e *SMD*.

Todos juntos estão relacionados no processo de desintegração da nuvem de gotas e podem ser calculados por meio de modelos empíricos.

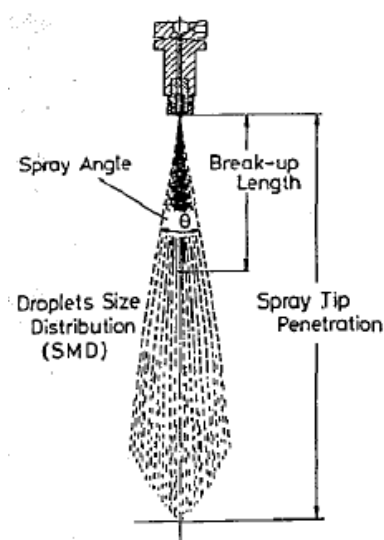


Figura 3.1: Características principais das nuvens de gotas [29].

Nesta dissertação, o ângulo da nuvem de gotas e o *SMD*, são as características consideradas para comparação. A penetração da nuvem de gotas não é alvo de estudo uma vez que se procederam a simulações em regime contínuo, independentes do tempo de injeção.

O objectivo deste capítulo é obter resultados das características das nuvens de gotas para vários combustíveis, de uma forma empírica. Os detalhes experimentais necessários estão apresentados em tabelas adjacentes aos vários resultados.

3.1 Comprimento de Desintegração

A equação seguinte foi deduzida por Hiroyasu e Arai [29], a partir de dados experimentais que cobriam uma vasta gama de condições:

$$L_b = 7,0d \left(1 + 0,4 \frac{r}{d}\right) \left(\frac{P_g}{\rho_l V_{inj}^2}\right)^{0,05} \left(\frac{L}{d}\right)^{0,13} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0,5}, \quad (3.1)$$

onde L_b é o comprimento de desintegração, d o diâmetro do atomizador, r o raio do lábio de entrada do atomizador, P_g a pressão do meio gasoso ambiente, V_{inj} a velocidade de injeção, L o comprimento do atomizador, ρ_l a densidade do líquido e ρ_g a densidade do meio gasoso.

Esta equação inclui o efeito do arredondamento do lábio de entrada do atomizador, o que desloca o início da cavitação e turbulência para valores mais elevados de pressão de injeção e aumenta o comprimento de desintegração. A influência da cavitação e da turbulência também está incluída, através do termo $\left(\frac{P_g}{\rho_l V_{inj}^2}\right)$.

Todos os modelos empíricos incluem a razão de densidades nas suas equações, logo, as suas previsões para a variação de densidades são aproximadamente as mesmas. Mas em relação à pressão de injeção, só o modelo de Hiroyasu e Arai [29] a inclui, indirectamente através da velocidade de injeção, V_{inj} .

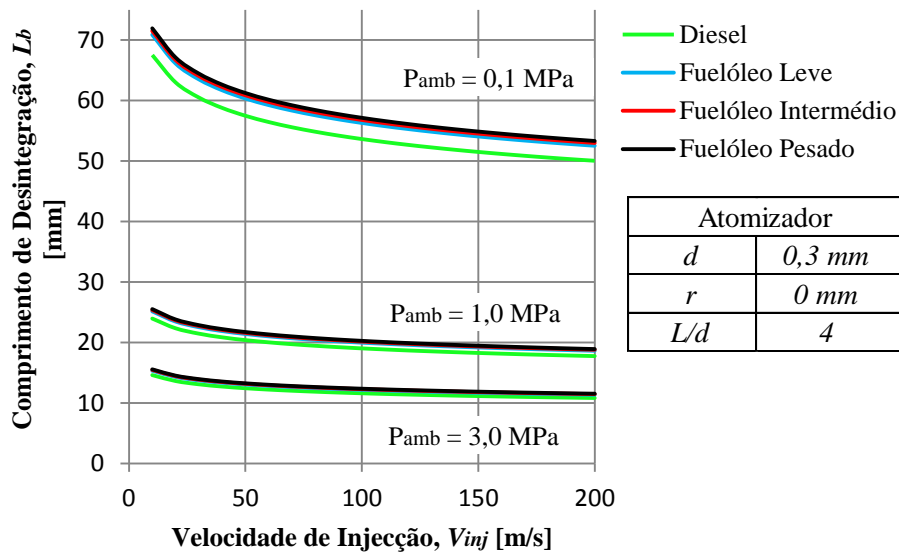


Figura 3.2: Influência da velocidade de injeção no comprimento de desintegração.

A Figura 3.2 mostra que o comprimento de desintegração diminui para todos os combustíveis com o aumento da velocidade de injeção. Verifica-se ainda o efeito da pressão do meio gasoso, onde se vê que o aumento da pressão reduz a diferença do comprimento de desintegração entre os diferentes combustíveis. O contínuo aumento da velocidade de injeção também leva o comprimento de desintegração a tender para um valor constante.

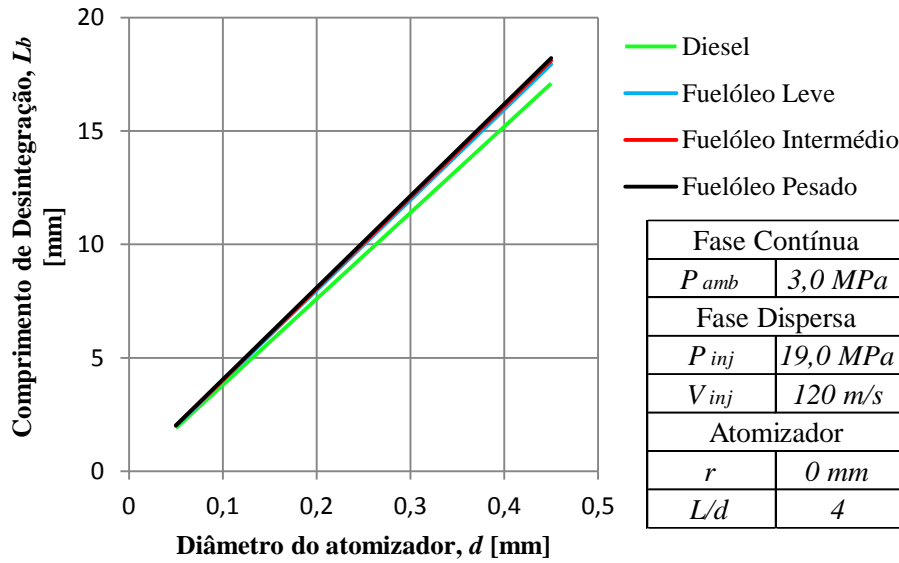


Figura 3.3: Influência do diâmetro do atomizador no comprimento de desintegração.

A influência do diâmetro do atomizador é apresentada na Figura 3.3, onde se verifica que o seu aumento conduz ao aumento simultâneo do comprimento de desintegração. Com o aumento do diâmetro também a diferença entre o comprimento de desintegração dos fuelóleos e do Diesel fica mais evidente.

3.2 Ângulo da Nuvem de Gotas

O ângulo da nuvem de gotas, apresentado na Figura 3.1 [29], é influenciado pelas características do atomizador, as propriedades dos combustíveis e as condições ambientais. Durante a injeção, o ângulo aumenta rapidamente, atinge um máximo e depois diminui até chegar a um valor constante [1]. Muitos autores tentaram avaliar e calcular esse valor constante.

Arrègle *et al.* [37] deduziram uma equação simples, com diferentes coeficientes derivados de resultados experimentais com combustível Diesel. Esta equação depende apenas do diâmetro do atomizador, da pressão de injeção e da densidade do meio gasoso:

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = d^{0,508} P_{inj}^{0,00943} \rho_g^{0,335}, \quad (3.2)$$

onde d é o diâmetro do atomizador, P_{inj} é a pressão de injeção e ρ_g a densidade do meio gasoso.

Pode-se verificar que o ângulo da nuvem de gotas depende muito pouco da pressão de injeção, pois o expoente é muito pequeno. Os únicos parâmetros que parecem ter influência clara no ângulo da nuvem de gotas são as características geométricas do atomizador e a pressão do meio gasoso ambiente.

Hiroyasu e Arai [29] propuseram uma relação empírica que inclui algumas características do atomizador:

$$\theta = 83,5 \left(\frac{L}{d}\right)^{-0,22} \left(\frac{d}{d_{cam}}\right)^{0,15} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,26}, \quad (3.3)$$

onde L é o comprimento do atomizador, d o diâmetro do atomizador, d_{cam} o diâmetro da ante-câmara do atomizador, ρ_g a densidade do meio gasoso e ρ_l a densidade do líquido.

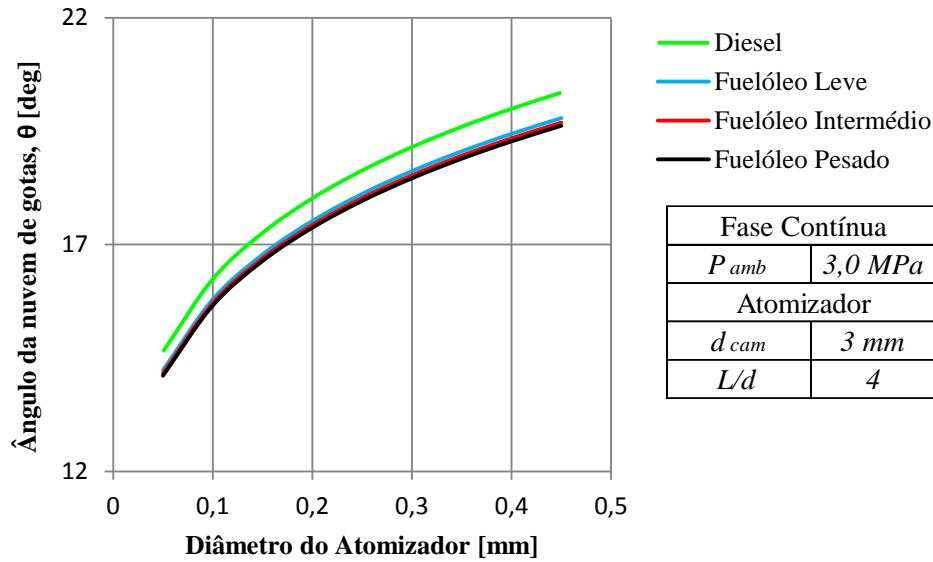


Figura 3.4: Influência do diâmetro do atomizador no ângulo da nuvem de gotas.

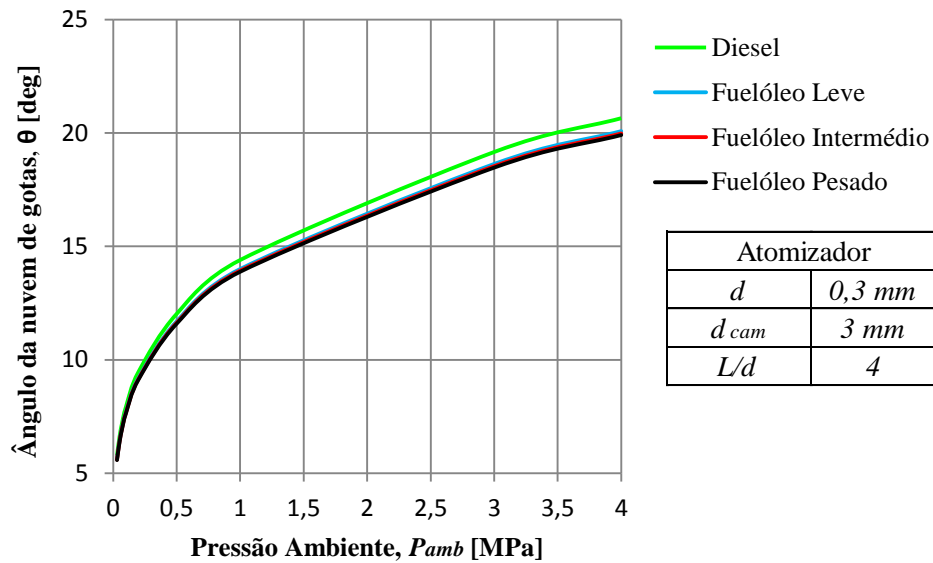


Figura 3.5: Influência da pressão ambiente no ângulo da nuvem de gotas.

A influência do diâmetro do atomizador é apresentada na Figura 3.4, onde se verifica que o seu aumento conduz ao aumento simultâneo do ângulo de nuvem de gotas. Com o aumento do diâmetro também a diferença entre o ângulo dos fuelóleos e do Diesel ganha maiores proporções. A mesma situação se verifica na Figura 3.5 com a influência da pressão ambiente.

3.3 Diâmetro Médio de Sauter (*SMD*)

O *SMD*, caracteriza uma única gota, cuja razão volume/área superficial é igual à razão de toda a nuvem de gotas:

$$d_{32} = \frac{\sum N_i d_i^3}{\sum N_i d_i^2} . \quad (3.4)$$

O *SMD* é uma grandeza que define o tamanho médio das gotas na nuvem. Muitos estudos e correlações descrevem o *SMD* como dependente da distância ao atomizador ou da fase de desintegração [38], [39], [40].

Muitos dos modelos de *SMD* disponíveis na literatura, principalmente por dependerem do tempo de injeção não são pertinentes para comparação, contudo Hiroyasu e Arai [29] estudaram os efeitos sobre o *SMD* de vários parâmetros tais como a pressão ambiente, a pressão de injeção ou as características dos atomizadores. Análises adimensionais levaram às seguintes equações experimentais:

$$d_{32} = \max[d_{32_{LS}}, d_{32_{HS}}] , \quad (3.5)$$

$$d_{32_{LS}} = 4,12 d Re_l^{0,12} We_l^{-0,75} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0,54} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,18} , \quad (3.6)$$

$$d_{32_{HS}} = 0,38 d Re_l^{0,25} We_l^{-0,32} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0,37} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0,47} , \quad (3.7)$$

onde d é o diâmetro do atomizador, Re_l e We_l são os números de Reynolds e Weber, respectivamente, baseados nas propriedades dos combustíveis e no diâmetro do atomizador, μ_l e μ_g são as viscosidades dinâmicas dos combustíveis e do meio gasoso, respectivamente, ρ_l a densidade do líquido e ρ_g a densidade do meio gasoso. É nos resultados do *SMD* que se verificam as grandes diferenças entre os combustíveis, como se pode verificar na Figura 3.6.

Apesar dos valores de *SMD* diminuírem muito com o aumento da velocidade de injeção, os fuelóleos apresentam sempre valores muito elevados em comparação com o Diesel, o que já se esperava tendo em conta as diferenças de viscosidade.

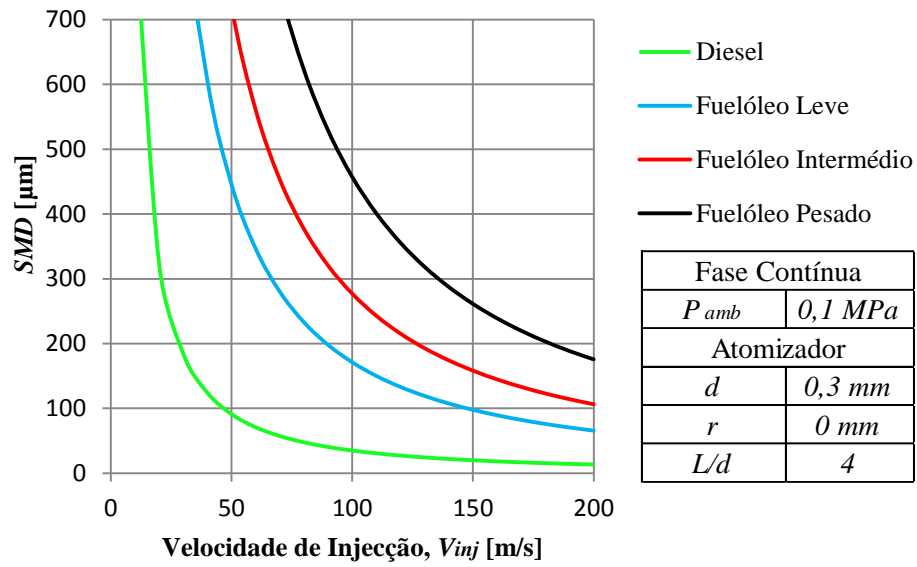


Figura 3.6: Influência da velocidade de injeção no SMD.

Capítulo 4

Modelação Numérica

A modelação numérica sofreu uma grande evolução nas últimas décadas, abrangendo problemas cada vez mais complexos. Tornou-se assim uma ferramenta útil na engenharia tanto em actividade de projecto como em investigação, simulando fenómenos e podendo substituir alguns ensaios experimentais, o que consequentemente leva a uma redução de custos. A simulação numérica da injeção de líquidos, por exemplo, pode otimizar a concepção do atomizador e melhorar a qualidade da atomização em várias aplicações.

Nesta dissertação o modelo numérico utilizado é o código comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional, ANSYS FLUENT, que simula numericamente a atomização de combustível utilizando o modelo de fase dispersa, *DPM*, na modelação das fases contínua e dispersa. Este programa permite importar a malha, gerada com o programa GAMBIT, e definir as condições de fronteira, as propriedades dos fluidos, os esquemas numéricos e os respectivos parâmetros.

Neste capítulo apresenta-se uma breve descrição do modelo numérico utilizado, das equações dos submodelos necessários à simulação, do modelo de fase dispersa, dos esquemas numéricos e da malha gerada.

4.1 Descrição do Modelo Numérico

O código ANSYS FLUENT, utilizado nesta dissertação, contém diversos submodelos que permitem simular vários tipos de escoamento resolvendo numericamente as equações fundamentais da dinâmica dos fluidos. É possível simular problemas envolvendo escoamentos térmicos (convecção, condução e radiação), combustão, fluidos não Newtonianos, escoamentos compressíveis e multifásicos entre outros [31]. A simulação da atomização realiza-se aplicando o submodelo *DPM*, “*Discrete Phase Model*” na literatura inglesa.

O ANSYS FLUENT aplica uma técnica de volumes finitos para resolver um conjunto de equações dependendo do problema específico, utilizando o Método dos Volumes Finitos, MVF que teve origem a partir do Método das Diferenças Finitas, MDF [41]. O MDF foi fortemente utilizado no passado em problemas de dinâmica de fluidos e transferência de calor, no entanto apresenta deficiências quando as geometrias são complexas, o que ocorre em grande parte dos problemas práticos.

A aplicação do MDF tem por base a representação das derivadas espaciais e temporais através de expressões algébricas, sendo essas expressões obtidas usando as séries de Taylor. Este tipo de aproximação gera erros de arredondamento, conseguindo-se porém manter um controlo sobre esses erros e as suas influências. A partir do MDF foi desenvolvido o MVF, onde as equações discretas são obtidas através do balanço de conservação da propriedade (massa, quantidade de movimento e energia) no volume de controlo. Desta forma, é possível garantir a conservação da massa e da quantidade de movimento no volume de controlo, o que juntamente com a possibilidade de usar este método em malhas não estruturadas, é uma grande vantagem relativamente ao MDF.

4.2 Equações

As equações de Navier-Stokes são uma simplificação das equações de quantidade de movimento para escoamento incompressível. Para além destas, o ANSYS FLUENT resolve ainda pelo menos a equação de conservação da massa e para escoamentos com transferência de calor ou efeitos de compressibilidade, resolve adicionalmente a equação de conservação de energia. Para escoamentos que envolvem mistura de espécies ou reacções, uma equação de conservação de espécies também é resolvida. Quando o escoamento é turbulento são resolvidas equações de transporte adicionais.

Nesta secção apresentam-se as equações de conservação, com média de Reynolds: da massa, da quantidade de movimento, da energia, das espécies e da turbulência, que são necessárias ao problema abordado nesta dissertação. Segue-se aqui a exposição da referência [31].

4.2.1 Conservação da Massa

A equação da conservação da massa, ou equação da continuidade, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m, \quad (4.1)$$

onde S_m é a massa adicionada à fase contínua, proveniente da fase dispersa, devido à evaporação das gotas. Esta é a fórmula geral e é válida tanto para escoamentos incompressíveis como compressíveis.

Para geometrias bidimensionais axi-simétricas, a equação da continuidade é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m, \quad (4.2)$$

onde x é a coordenada axial, r é a coordenada radial, v_x é a velocidade axial e v_r a velocidade radial.

4.2.2 Conservação da Quantidade de Movimento

A equação, na forma vectorial, de conservação da quantidade de movimento, num referencial fixo é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (4.3)$$

onde p é a pressão estática, $\bar{\tau}$ é o tensor das tensões descrito abaixo, $\rho \vec{g}$ é o peso por unidade de volume e \vec{F} é uma força externa (também por unidade de volume), que surge a partir da interacção da fase dispersa com a fase contínua.

O tensor das tensões, $\bar{\tau}$, é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right], \quad (4.4)$$

onde μ é a viscosidade, I é o tensor de unidade e o segundo termo do lado direito é o efeito da dilatação do volume.

Para geometrias bidimensionais axi-simétricas, as equações de conservação do quantidade de movimento axial e radial escrevem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad (4.5)$$

e

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] \\ - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r \end{aligned} \quad (4.6)$$

onde

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r}. \quad (4.7)$$

4.2.3 Energia

O programa permite incluir no modelo a transferência de calor, o que é útil ao presente trabalho na medida em que tem em conta a evaporação das gotas de combustível. A transferência de calor é introduzida através da equação da energia, descrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_i h_i \vec{J}_i + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right] + S_h, \quad (4.8)$$

onde k_{eff} é a condutividade térmica efectiva ($k + k_t$, onde k_t é a condutividade térmica turbulenta, definida de acordo com o modelo de turbulência em uso), e \vec{J}_i é a difusividade das espécies. Os primeiros três termos do lado direito representam a transferência de energia devido à condução, à difusão das espécies e à dissipação viscosa, respectivamente. S_h inclui o calor da reacção química, e quaisquer outras fontes de calor incluídas pelo utilizador. A energia, E , é definida como se segue:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}. \quad (4.9)$$

Aqui h é a entalpia para gases ideais, descrita como o somatório das fracções mássicas a multiplicar pela entalpia das espécies:

$$h = \sum_i Y_i h_i. \quad (4.10)$$

É importante referir que a entalpia calcula-se integrando o calor específico, sendo os limites de integração a temperatura de referência, T_{ref} , e a temperatura instantânea, T , em que a temperatura de referência no programa é 298,15 K:

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,i} dT, \quad (4.11)$$

4.2.4 Transporte das Espécies

Na atomização de combustíveis existem pelo menos duas espécies diferentes, uma está na fase gasosa (oxidante) e a outra é injectada (combustível), a qual, após evaporação vai para a fase gasosa, onde é possível misturar-se com o oxidante.

Quando se opta por resolver as equações de conservação das espécies químicas, o programa prevê a fracção mássica local para cada espécie, Y_i , através da solução de uma equação de convecção-difusão para i espécies. Esta equação de conservação tem a seguinte forma geral:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i, \quad (4.12)$$

onde R_i é o rácio de produção de espécies i por reacção química e S_i é o rácio de produção através da adição da fase dispersa. A equação é resolvida para $N-1$ espécies, onde N é o número total de espécies químicas presentes no sistema.

4.2.5 Turbulência

O ANSYS FLUENT oferece muitas opções diferentes para a modelação da turbulência, porém, para a situação em estudo, os modelos $k-\varepsilon$ constituem uma boa base para análise. Estes modelos são razoavelmente pouco exigentes em termos de computação e no entanto, fornecem um cálculo mais preciso que o modelo Spalart-Allmaras, de uma única equação [42].

Com o emprego de duas equações, os modelos $k-\varepsilon$ representam um modelo de turbulência completo e simples, ao resolver as duas equações de transporte de forma independente. O modelo $k-\varepsilon$ padrão pertence a uma classe de modelos que têm sido o cavalo de batalha dos engenheiros no cálculo de escoamentos, desde que foi proposto por Launder e Spalding [43]. É um modelo semi-empírico que se baseia em equações de transporte para a energia cinética turbulenta, k , e a sua taxa de dissipação, ε .

Este modelo é conhecido pela sua robustez e precisão razoável para uma grande variedade de escoamentos turbulentos e assenta nos pressupostos de que o escoamento é completamente turbulento, e que os efeitos da viscosidade molecular são negligenciáveis. Com a identificação dos pontos fortes e fracos do modelo $k-\varepsilon$ padrão, têm sido desenvolvidos avanços a fim de melhorar o seu desempenho e no ANSYS FLUENT estão disponíveis duas variantes deste modelo: o modelo $k-\varepsilon$ RNG [44] e o modelo $k-\varepsilon$ realizável [45].

O modelo $k-\varepsilon$ RNG usa a teoria de renormalização para derivar analiticamente equações mais precisas para uma classe mais ampla de escoamentos do que o modelo $k-\varepsilon$ padrão. No entanto, devido aos termos extras e um maior grau de não-linearidade, os cálculos com o modelo $k-\varepsilon$ RNG tendem a exigir mais tempo de computação do que com o modelo $k-\varepsilon$ padrão.

Em contraste, o modelo $k-\varepsilon$ realizável requer apenas um pouco mais de esforço computacional do que o modelo $k-\varepsilon$ padrão, ao fornecer benefícios adicionais, logo é o modelo utilizado nas simulações da presente dissertação. O termo realizável significa que o modelo satisfaz certas restrições matemáticas sobre as tensões de Reynolds, de acordo com a física dos escoamentos turbulentos. Este modelo é mais adequado para jactos axi-simétricos e fornece uma previsão mais exacta da velocidade dos jactos que o modelo $k-\varepsilon$ padrão. Tem também um desempenho superior em escoamentos que envolvem rotação, camadas limite e recirculação. Este modelo difere do modelo padrão de duas maneiras importantes. O modelo realizável contém uma nova formulação para a viscosidade turbulenta e uma nova equação de transporte para a taxa de dissipação, ε .

As equações de transporte para k e ε no modelo realizável de $k-\varepsilon$ são:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.13)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4.14)$$

onde

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}.$$

Nestas equações, G_k representa a geração de energia cinética devido aos gradientes de velocidade média. G_b representa a geração de energia cinética devido à flutuação. Y_M representa a contribuição da dilatação na turbulência compressível para a taxa de dissipação geral. C_1 , C_2 , $C_{1\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes. σ_k e σ_ε são os números de Prandtl para k e ε , respectivamente. S_k e S_ε são termos definidos pelo utilizador.

4.3 Modelo de Fase Dispersa, *DPM*

Para a modelação numérica de problemas multifásicos, onde se têm, por exemplo, partículas (fase secundária) dispersas num meio contínuo (fase primária), existem duas abordagens que podem ser aplicadas: a abordagem de Euler-Lagrange e a abordagem de Euler-Euler.

Na abordagem de Euler-Lagrange, usa-se um modelo Lagrangiano para descrever as trajectórias individuais de cada partícula à medida que fluem através do meio contínuo. Por sua vez, resolve-se o meio contínuo através das equações de Navier-Stokes, escritas considerando médias temporais das flutuações turbulentas das diversas variáveis.

Na abordagem de Euler-Euler assume-se que ambas as fases, primária e secundária, são meios contínuos interligados, uma vez que o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase. No ANSYS FLUENT estão disponíveis três modelos multifásicos diferentes sob esta abordagem: o modelo de volume de fluido (*VOF*), o modelo de mistura e o modelo Euleriano.

O modelo de fase dispersa, *DPM*, da abordagem de Euler-Lagrange, é o modelo recomendado para o estudo da atomização [31], pois fornece um modelo desenvolvido especialmente para a simulação de nuvens de gotas ou, de um modo mais geral, para a simulação das trajectórias de partículas em suspensão. Neste modelo bifásico calculam-se as interacções entre as duas fases em termos de massa, de quantidade de movimento e de energia. No que se segue, apresentam-se os aspectos do *DPM* relevantes para o caso em estudo.

4.3.1 Modelo de Atomizador

Como descrito no Capítulo 2, a desintegração primária ocorre no regime de atomização. Assim, presume-se que não há nenhum núcleo líquido, ou seja, todo o líquido divide-se em gotas imediatamente após a saída do orifício do atomizador. É aqui que o modelo de atomizador

ganha relevância. O atomizador cria as condições iniciais, para o cálculo da trajectória das partículas, definindo o diâmetro inicial das gotas, a velocidade e o ângulo da nuvem de gotas. A seguir, apresenta-se sem entrar em detalhes, o procedimento do programa para determinar o estado do escoamento interno do atomizador e as suas consequências para as simulações.

Para o modelo de atomizador de orifício plano estão definidos três regimes de operação, nomeadamente, monofásico (“*single-phase*” na literatura inglesa), cavitação (“*cavitating*” na literatura inglesa) e turbilhão hidráulico (“*hydraulic-flip*” na literatura inglesa). Os diagramas para cada caso são apresentados na Figura 4.1 (adaptada de [31]).

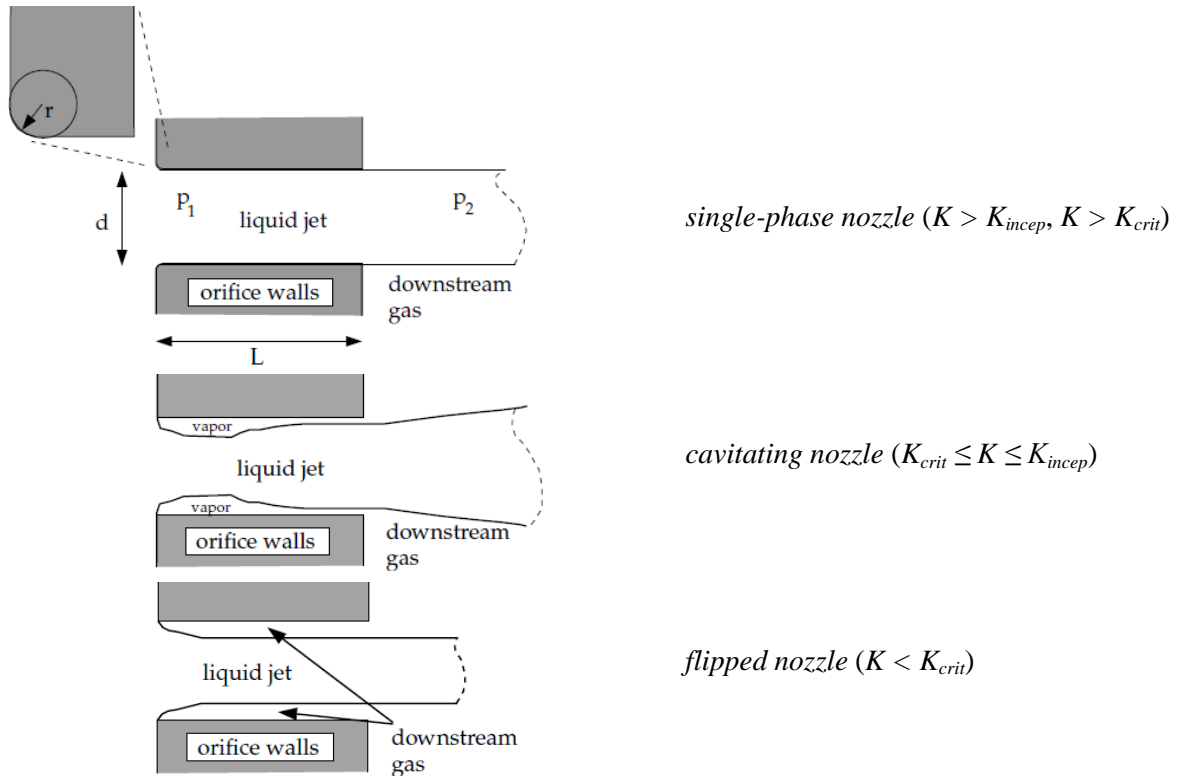


Figura 4.1: Regimes de escoamento de atomizadores de orifício plano (adaptado de [31]).

O raio do lábio de entrada, r , o diâmetro do orifício, d , e o comprimento do atomizador, L , são detalhes geométricos que são utilizados como parâmetros. Do lado direito da figura estão também identificados os regimes correspondentes com base no número de cavitação, K , definido por:

$$K = \frac{p_1 - p_{vap}}{p_1 - p_2} \approx \frac{p_1}{p_1 - p_2}. \quad (4.15)$$

K_{insep} e K_{crit} são os valores a que ocorre o início da cavitação e o número crítico de cavitação, respectivamente. Estes números de cavitação podem ser obtidos através de relações empíricas baseadas em dados experimentais. O escoamento em cavitação é o principal regime em que operam os injectores Diesel de alta pressão, actualmente.

Uma vez conhecido o regime de escoamento interno do atomizador, o cálculo do diâmetro inicial e da velocidade inicial das gotas prossegue de acordo com o esquema da Figura 4.2.

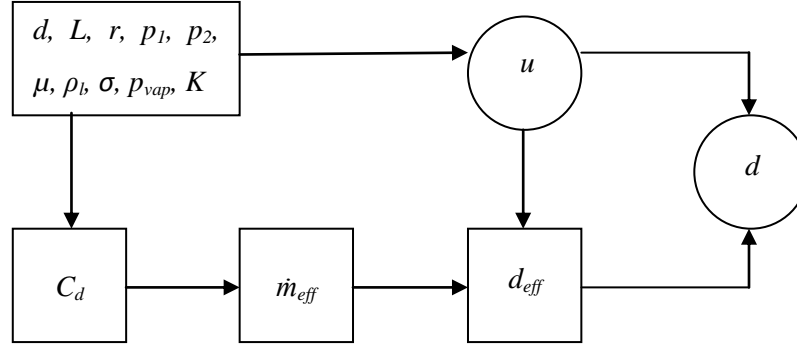


Figura 4.2: Esquema do cálculo inicial do diâmetro e velocidade das gotas.

Dado o número de cavitação, K , os dados do caso em estudo (d, L, r, p_1, p_2 ; ver Figura 4.1) e as propriedades do líquido ($\mu, \rho_l, \sigma, p_{vap}$), são calculados o coeficiente de descarga, C_d , e a velocidade inicial, u . Depois, através do caudal efectivo, \dot{m}_{eff} , e do diâmetro efectivo do atomizador d_{eff} , obtém-se um diâmetro inicial de gotas.

Para completar, para além do tamanho e da velocidade, a direcção inicial (ângulo da nuvem de gotas) deve ser definida. O que é realizado novamente por uma relação empírica. O ângulo de nuvem de gotas, é duas vezes o ângulo entre o limite exterior da nuvem e o eixo principal desta. Na literatura há várias relações propostas para o ângulo de nuvem de gotas, mas a utilizada no modelo *DPM* é a relação simplificada de Reitz e Bracco [46]:

$$\frac{\theta}{2} = \tan^{-1} \left[\frac{4\pi}{C_A} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,5} \frac{\sqrt{3}}{6} \right], \quad (4.16)$$

com

$$C_A = 3,0 + \frac{L}{3,6d}. \quad (4.17)$$

4.3.2 Movimento de Partículas

O cálculo da trajectória de uma partícula na fase dispersa é feito por meio da integração das forças que actuam sobre a gota. O equilíbrio de forças na notação vectorial escreve-se da seguinte forma:

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = F_D(\vec{v} - \vec{v}_p) + \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \right) \vec{g} + \vec{F}, \quad (4.18)$$

onde o termo da esquerda é a aceleração da partícula em questão, \vec{F} é um termo adicional da aceleração e o termo com F_D é a força de arrasto sobre a partícula. F_D é definido como:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}. \quad (4.19)$$

O coeficiente de arrasto, C_D , determina-se a partir do modelo de arrasto dinâmico que representa os efeitos de distorção das gotas, variando de forma linear o arrasto entre a forma de uma esfera e de um disco. O termo com \vec{g} na Equação (4.18) é a contribuição da aceleração gravítica.

4.3.3 Acoplamento de Fases

Enquanto a fase de partículas dispersas é sempre influenciada pela solução da fase contínua (acoplamento de uma via, “*one-way coupling*” da literatura inglesa), o inverso (acoplamento de duas vias, “*two-way coupling*” da literatura inglesa) é apenas fornecido como opção. Quando se aplica esta opção segue-se um procedimento iterativo, em que após o cálculo da trajectória das partículas, a fase contínua é resolvida novamente com dados actualizados até a convergência ser alcançada. Na Figura 4.3 apresenta-se um esquema do processo.

Como a fase dispersa durante a injeção possui uma quantidade de movimento elevada, o que afecta consideravelmente a fase contínua, o acoplamento de duas vias é a melhor opção para o presente estudo.

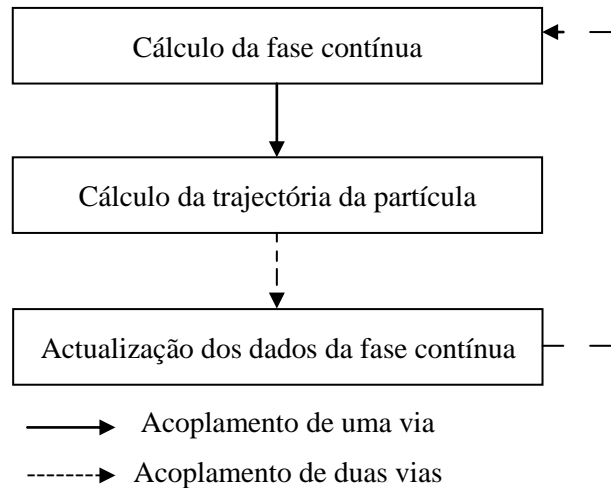


Figura 4.3: Procedimento de resolução de acoplamentos de uma e duas vias.

A troca de massa, quantidade de movimento e energia entre as fases contínua e dispersa calcula-se pela variação das suas quantidades relativas nas partículas que passam através de cada célula computacional, como se pode ver na Figura 4.4 [31].

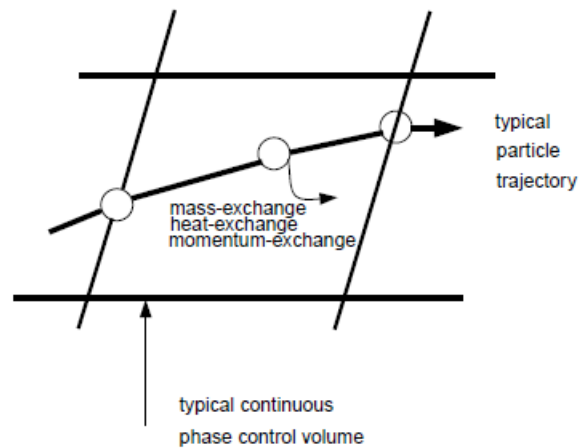


Figura 4.4: Transferência de massa, quantidade de movimento e calor entre as fases dispersa e contínua [31].

Estas alterações agem como termos base no cálculo da fase contínua. Assim, no caso de uma nuvem de gotas num ambiente quente, os termos base da massa e da quantidade de movimento são positivos. Mas a energia é geralmente negativa, porque o combustível, com uma temperatura de injeção relativamente baixa, tem de ser aquecido e, eventualmente, evaporado.

Para as gotas não reactivas, o modelo faz uma distinção entre os modos de aquecimento/vaporização. O primeiro é o aquecimento sem vaporização até atingir a temperatura de vaporização definida pelo utilizador. A partir deste valor, as gotas podem aquecer e vaporizar ao mesmo tempo.

A temperatura de vaporização é, naturalmente, uma fronteira artificial entre o aquecimento e a vaporização, porque o líquido pode vaporizar a qualquer temperatura, e daí o conceito de pressão de vaporização. Mas desta forma, o cálculo de troca de massa devido à vaporização a baixas temperaturas pode ser negligenciado para poupar tempo.

Finalmente, quando se atinge a temperatura de ebulição definida pelo utilizador, todo o calor adicionado às partículas é utilizado para a vaporização, de modo a que a temperatura das gotas não se altere mais.

4.3.4 Colisão e Desintegração

Durante o movimento das gotas através de todo o domínio, estas podem desintegrar-se em gotas mais pequenas de várias maneiras diferentes, como explicado no Capítulo 2. Mas as gotas também podem colidir umas com as outras. Ambos os fenómenos estão incluídos no modelo.

Dos modelos de desintegração de gotas destacam-se o modelo *TAB*, “*Taylor Analogy Breakup*” da literatura inglesa, para injeções com baixo número de Weber, o modelo *Wave* para injeções com elevado número de Weber. Nos sistemas típicos de injeção de combustível ($We > 100$) o modelo de desintegração *Wave* de Reitz [47] é a melhor opção.

Este modelo assume a desintegração devido à velocidade relativa entre as fases gasosa e líquida, e a geração de pequenas gotas a partir da gota principal é induzida pelo crescimento das instabilidades de Kelvin-Helmholtz sobre a superfície do líquido. A variação do raio da gota principal e a dimensão das gotas resultantes estão relacionadas com a frequência, Ω , e o comprimento de onda, Λ , da onda superficial com maior crescimento [48]. A Figura 4.5 [48] representa esquematicamente o modelo *Wave*. Na figura, r é o raio da gota recém-formada em função do comprimento de onda, Λ , e da constante do modelo, B_0 . Kong *et al.* [48] sugerem o valor $B_0 = 0,61$. O parâmetro η é um deslocamento infinitesimal axi-simétrico da superfície e actua como base para a análise de estabilidade.

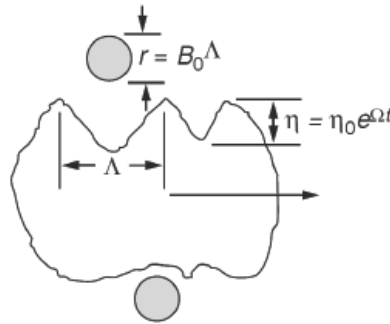


Figura 4.5: Esquema do modelo de desintegração *Wave* [48].

A colisão entre gotas pode ser importante em zonas com uma elevada densidade de partículas. Olhando para todo o domínio computacional, existem N gotas que resultam em $\frac{1}{2}N^2$ pares de colisão possíveis. Isto implica a necessidade de uma grande capacidade de processamento, uma vez que existem milhões de gotas, logo, é necessário um método simplificado. Isto consegue-se através da utilização do algoritmo de O'Rourke [49], que reduz o custo computacional através da introdução de parcelas, considerando apenas colisões entre estas. As denominadas parcelas são grupos de partículas que têm propriedades idênticas, como diâmetro, temperatura e velocidade. Assim, nos cálculos de colisão apenas alguns milhares de parcelas são tratadas como gotas individuais, reduzindo a quantidade de pares de colisão possíveis.

Em contraste com a desintegração, as colisões diminuem a quantidade de partículas devido à coalescência. Mas também são possíveis colisões elásticas, que não alteram o número de partículas. Uma vez determinado que duas parcelas colidem, o passo seguinte é decidir se o resultado é coalescência ou afastamento.

Se o resultado da colisão é a coalescência das gotas, as novas propriedades são calculadas a partir das leis da conservação. Caso contrário, se a colisão é elástica, as novas propriedades são calculadas a partir da conservação da quantidade de movimento e da energia cinética.

4.3.5 Limitações

O modelo *DPM* do ANSYS FLUENT parece conter todas as funcionalidades necessárias para capturar a maior parte da física inerente às nuvens de gotas, mas também há algumas limitações importantes do ponto de vista computacional.

Provavelmente, a desvantagem mais importante do modelo surge na imposição da abordagem de Euler-Lagrange de que o volume de uma célula contenha no máximo, dez a doze por cento de partículas na fase dispersa. Caso contrário, a fase dispersa ocupa uma quantidade significativa do volume da fase contínua, e no cálculo da fase contínua o seu volume é constante e igual ao especificado pelo utilizador, o que daria resultados errados de interacção entre as duas fases.

Na prática, esta restrição significa que as células computacionais, especialmente perto da saída do atomizador, devem ser suficientemente grandes. Este é o ponto em que é necessário um equilíbrio entre células relativamente grandes em favor do modelo *DPM* por um lado, e de células pequenas para efectuar a simulação com a maior precisão possível, por outro lado.

4.4 Esquemas Numéricos

O ANSYS FLUENT oferece várias formas diferentes de resolução das equações inerentes aos casos em estudo. Todas fornecem resultados para uma ampla variedade de problemas mas, em alguns casos, uma formulação pode ter melhor desempenho, ou seja, obter uma solução mais rapidamente, do que outras.

Para definir o método de acoplamento entre velocidade e pressão, o ANSYS FLUENT tem quatro tipos de algoritmos segregados, SIMPLE, SIMPLEC, PISO e FSM, e um algoritmo acoplado *Coupled*, também referido como “*pressure-based coupled algorithm*”. As abordagens segregada e acoplada diferem na maneira como as equações da continuidade, da quantidade de movimento, da energia e das espécies são resolvidas. Os algoritmos segregados resolvem estas equações sequencialmente, ou seja, segregadas umas das outras, enquanto o algoritmo acoplado resolve-as simultaneamente.

Nesta dissertação recorre-se ao algoritmo acoplado *Coupled*, que oferece algumas vantagens em relação aos algoritmos segregados, nomeadamente o acoplamento total entre velocidade e pressão e uma implementação mais robusta e eficiente da fase contínua.

O esquema de interpolação utilizado para a pressão é de segunda ordem, e para a quantidade de movimento usa-se um esquema *Upwind* de segunda ordem, sempre com o objectivo de melhorar a precisão uma vez que outros esquemas disponíveis não são aplicáveis ao problema estudado nesta dissertação.

Como referido atrás, a modelação da turbulência efectua-se através do modelo realizável de k - ε . Para a discretização dos parâmetros k e ε usa-se o esquema *Upwind* de segunda ordem, pois apresenta menor difusividade em relação ao esquema de primeira ordem.

A escolha de esquemas de segunda ordem deve-se sobretudo à menor difusão numérica produzida, relativamente aos esquemas de primeira ordem, obtendo-se assim uma boa precisão dos resultados sem recorrer a esquemas de níveis superiores que consumiriam mais tempo de cálculo sem melhorias significativas.

Os parâmetros numéricos utilizados podem ser apresentados resumidamente, conforme apresentado na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resumo dos parâmetros numéricos utilizados.

Tempo	<i>Steady</i>
Modelo de Turbulência	κ - ε Realizável
Algoritmo de acoplamento entre a pressão e a velocidade	<i>Coupled</i>
Pressão	<i>Second Order</i>
Quantidade de Movimento	<i>Second Order Upwind</i>
κ	<i>Second Order Upwind</i>
ε	<i>Second Order Upwind</i>

4.5 Geração da Malha

A geração da malha é citada frequentemente como uma parte crítica e que consome o maior tempo na modelação numérica. Os resultados numéricos devem ser independentes da malha, ou seja, a sua precisão está intimamente ligada à sua qualidade. Adicionalmente, os programas de Dinâmica dos Fluidos Computacional são mais robustos e eficientes quando usam uma malha bem construída.

Segundo Merker *et al.* [50], uma boa malha deve ter as fronteiras bem definidas e ser suficientemente fina e adaptada ao problema em estudo. É assim fundamental conhecer em detalhe os métodos de geração de malha e adequar o número de elementos e as dimensões dos mesmos, nomeadamente a razão entre comprimento e largura, para o caso em estudo.

Para além do já referido, a discretização do domínio de cálculo deve ser adequada à intensidade da variação das propriedades dos escoamentos (gradiente de velocidade, de pressão

e de fracção de volume). Com estes factores como guia para a construção da malha pretende-se ainda evitar a sobrecarga dos recursos computacionais para a resolução.

Nesta dissertação, a geração da malha efectua-se através do programa GAMBIT 2.4.6. Este programa tem disponíveis os métodos de malha estruturada e não-estruturada. O método de malha estruturada possui este nome devido ao facto da malha ser disposta num padrão regular e repetido. Este tipo de malha utiliza elementos quadriláteros em malha bidimensional e elementos hexaedros em malha tridimensional. A malha estruturada possibilita um bom controlo na sua construção, bem como um maior nível de precisão dos esquemas numéricos.

O método de malha não-estruturada utiliza uma colecção arbitrária de elementos para preencher o domínio de cálculo e o arranjo de elementos não tem nenhum padrão fixo. Este tipo de malhas utiliza triângulos e quadriláteros em malhas bidimensionais e tetraedros, hexaedros e prismas em malhas tridimensionais. O uso de malha não-estruturada permite gerar malhas em torno de geometrias complexas.

Não obstante, a maior versatilidade de adaptação da malha não estruturada no domínio de cálculo, utiliza-se neste trabalho uma malha estruturada bidimensional que devido à simetria capturará apenas metade da nuvem de gotas. A adaptação da malha estruturada ao domínio de cálculo é feita introduzindo deformações aos elementos, que se mantêm quadriláteros mas perdem a ortogonalidade.

Este método permite reduzir a despesa computacional mas tendo sempre em conta a precisão, pois obtém-se uma resolução fina sem o número de células que seriam necessárias numa malha tridimensional. Inicialmente são geradas quatro malhas e no próximo capítulo apresenta-se o estudo de independência da malha. Na Figura 4.6 apresenta-se um esquema das malhas criadas e das suas dimensões.

Pretende-se que as gotas evaporem na totalidade no interior do domínio. Como tal, para estipular as dimensões da malha recorreu-se ao tempo de vida das gotas, definido pela Equação (4.20) [1]:

$$t = \frac{d^2}{\lambda}, \quad (4.20)$$

onde d e λ são o diâmetro inicial e a constante de evaporação das gotas, respectivamente.

Considerando, segundo os resultados na literatura, um diâmetro máximo de gotas na ordem dos 50 μm , e que a constante de evaporação é constante e assume para o Diesel o valor de $0,79 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [1], o tempo de vida da gota é de 3,165 ms. Considerando uma velocidade de injeção máxima de 200 m/s, o domínio deve ter no mínimo um comprimento de 633 mm.

Como o estudo também implica o uso de fuelóleos, com uma constante de evaporação superior à do Diesel, optou-se por usar um comprimento de 1500 mm, cerca de 2,5 vezes superior ao calculado. Para a largura considerou-se metade do valor do comprimento, 750 mm, que corresponde a 2500 vezes o diâmetro do atomizador.

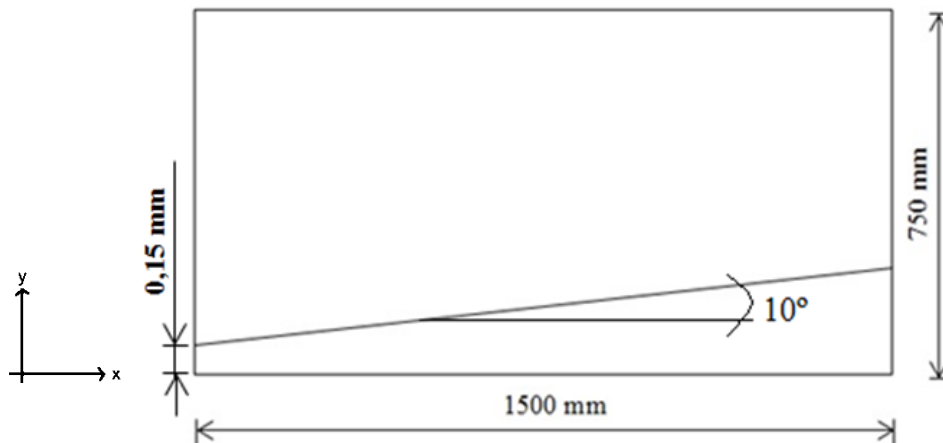


Figura 4.6: Esquema do domínio computacional.

As malhas são obtidas com o auxílio de funções de crescimento. O canto inferior esquerdo da malha é a origem do domínio computacional e o local onde se efectua a injeção. Os elementos à entrada da injeção são mais refinados. Cria-se igualmente uma zona representativa da fronteira entre a nuvem de gotas e o meio gasoso exterior. Para o cálculo da sua inclinação, considera-se um ângulo de 10° , por este ser metade do valor do ângulo de nuvem de gotas verificado nos resultados experimentais da literatura. Prestou-se também especial atenção às zonas limites do domínio computacional, onde se refinou as malhas como medida de prevenção contra o retrocesso do escoamento, “*reverse flow*” na literatura inglesa.

Finalizada a geração da malha, o programa GAMBIT permite indicar as condições de fronteira (condições de velocidade, condições de pressão, de caudal mássico, de parede, etc.) e também verificar a qualidade da mesma através da análise de alguns parâmetros geométricos.

4.5.1 Condições de Fronteira

As condições de fronteira relativas à entrada e saída de fluido, bem como, a especificação das leis de parede para a simulação do escoamento na proximidade de paredes sólidas estão desenvolvidas no ANSYS FLUENT. Nesta secção pretende-se indicar as condições de fronteira utilizadas.

Na fronteira inferior adoptou-se a condição “*axis*”, condição possível apenas quando o escoamento em estudo é axi-simétrico e utilizada de forma a reduzir a dimensão do domínio e consequentemente o tempo de cálculo. Nas fronteiras superior e de saída do domínio de cálculo adoptaram-se condições de pressão constante “*pressure inlet*” e “*pressure outlet*”, respectivamente. Na fronteira de entrada do domínio de cálculo adoptou-se a condição de parede de não escorregamento “*wall*”. A descrição numérica destas condições de fronteira pode ser encontrada no ANSYS FLUENT User’s Guide [31].

O esquema da Figura 4.7 apresenta as condições de fronteira da malha atribuídas no GAMBIT, que serão posteriormente utilizadas no ANSYS FLUENT.

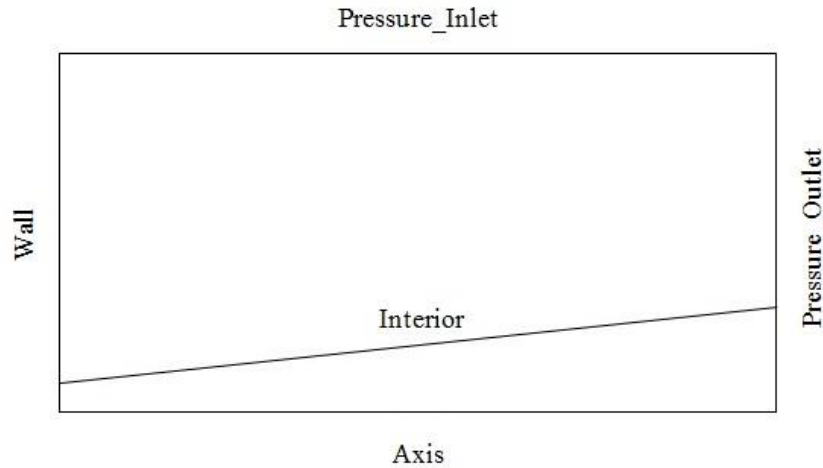


Figura 4.7: Condições de fronteira do domínio computacional.

4.6 Validação do Modelo Numérico

A validação do modelo numérico efectua-se de forma sequencial em duas etapas. Primeiro procede-se ao estudo de independência da malha, em que serão comparados os perfis de velocidade de injeção obtidos com condições equivalentes para as quatro malhas. Depois passa-se às simulações com combustível Diesel, cujos resultados serão comparados com resultados experimentais existentes na literatura.

4.6.1 Estudo de Independência da Malha

Numa abordagem Euleriana normal podem ser obtidos melhores resultados a partir de malhas mais finas e geralmente realiza-se uma investigação de independência da malha, por refinamento desta e comparando as diferenças. Este não é o caso para a abordagem Euler-Lagrangiana, onde teoricamente há uma malha “ideal”, devido às interações entre as fases Euleriana e Lagrangiana, o que significa que o refinamento da malha pode originar piores resultados. Isto não quer dizer que o estudo de independência da malha não deva ser realizado, uma vez que a malha tem uma grande influência nos resultados, e torna-se necessário garantir uma resolução suficiente, especialmente nas regiões com gradientes elevados. A fim de verificar a independência da malha na solução, foram geradas quatro malhas cujo número de células é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resolução das malhas estudadas.

Malha	Número de células
1	5345
2	6160
3	13594
4	22006

O método utilizado na geração das malhas é a alteração do número de células destas, em que se obtém o refinamento através da modificação da distribuição da densidade das células, isto é, a disposição das células junto das paredes do domínio computacional. A evolução desta disposição pode observar-se nas Figuras 4.8 e 4.9, que representam as malhas 1 e 4, respectivamente.

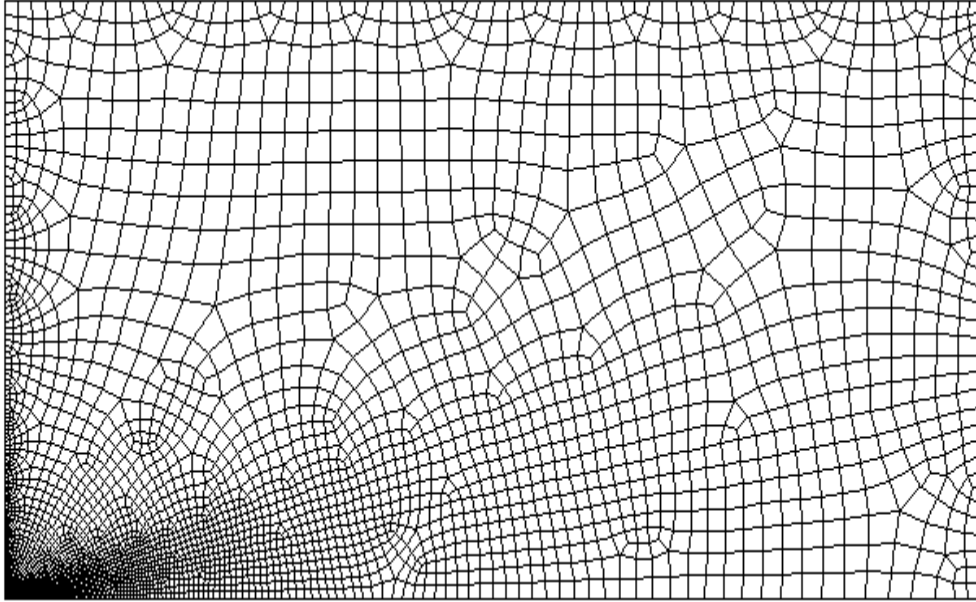


Figura 4.8: Malha 1.

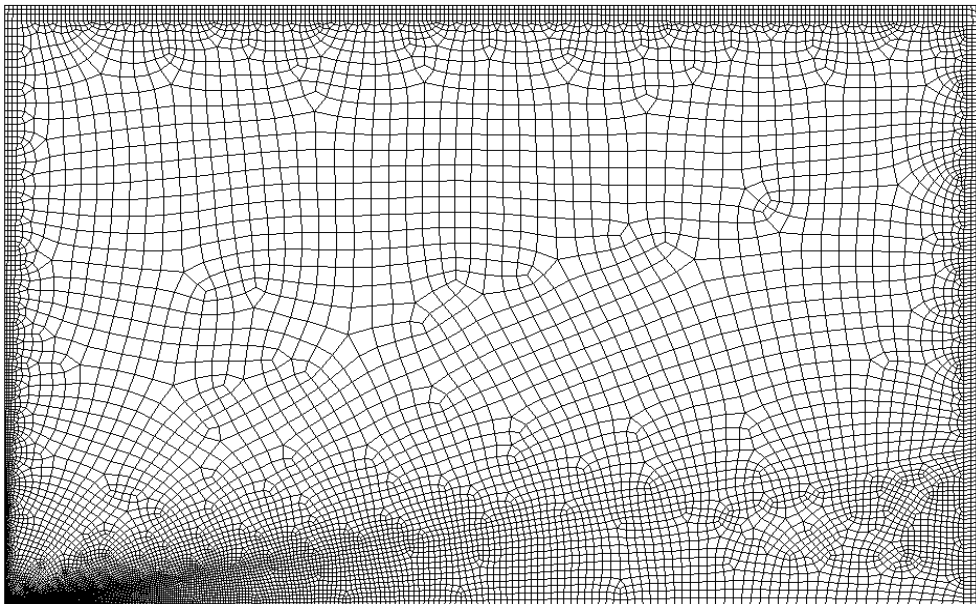


Figura 4.9: Malha 4.

Na determinação da independência da malha, deve obter-se um compromisso entre o quanto os resultados são independentes da densidade celular da malha e os recursos computacionais exigidos para o conseguir. Não vale a pena fazer uma malha, por exemplo, duas vezes mais densa para atingir um ganho de precisão irrisório, se o tempo de cálculo necessário aumenta exponencialmente.

Para levar a cabo uma análise mais aprofundada da forma como as diferentes malhas afectam os resultados computacionais procedeu-se à comparação dos perfis de velocidade obtidos, para o combustível Diesel com condições de injeção equivalentes. Assim, cada caso foi executado com um caudal de 0,007 kg/s, a uma temperatura de 298,15 K.

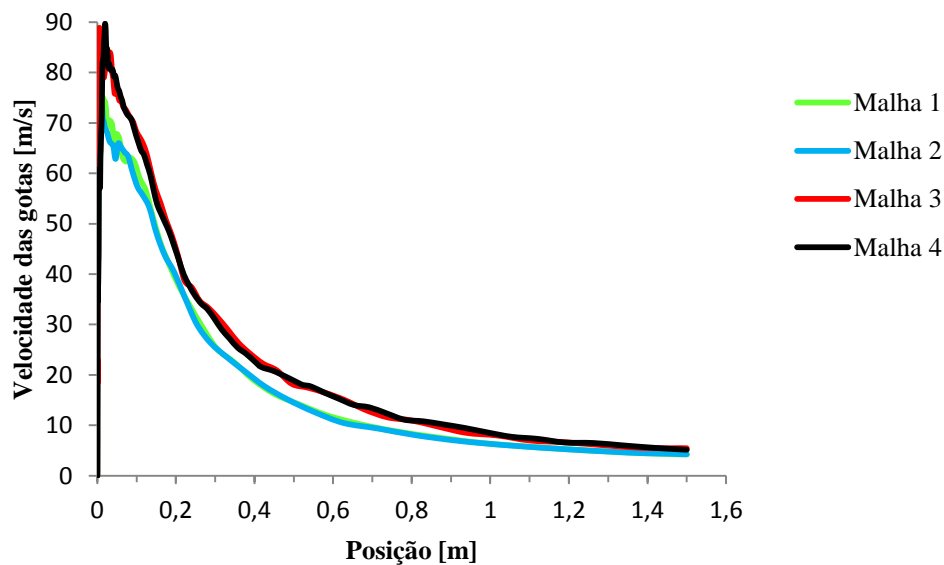


Figura 4.10: Perfis de velocidade das gotas ao longo do eixo do jacto.

Como se verifica na Figura 4.10, a solução numérica apresenta algumas diferenças entre as duas malhas iniciais e as restantes. Embora os perfis sejam bastante semelhantes, os valores de velocidade são um pouco diferentes, principalmente na proximidade do local onde se efectua a injeção. Esta diferença resulta do facto das duas malhas iniciais não apresentarem uma resolução suficiente nesta zona.

Contudo, verifica-se que os resultados obtidos para as malhas 3 e 4 não variam muito, apesar do acréscimo de cerca de 60% no número de células da malha 4 em relação à malha 3, o que prova que a solução é independente do número de células da malha.

4.6.2 Comparação com Resultados da Literatura

Os resultados para a independência da malha foram apresentados na secção anterior, mas a fim de garantir a confiança no modelo numérico para o próximo capítulo desta dissertação, procede-se agora a uma comparação entre resultados experimentais existentes na literatura e os resultados do modelo. Para estas simulações recorreu-se à malha 4, pois apesar do ligeiro aumento do tempo de cálculo necessário, esta malha é a que apresenta melhores resultados na zona onde é feita a injeção.

As simulações são efectuadas com base nas condições em que foram obtidos os resultados experimentais, de modo a assegurar que o modelo coincide com as características físicas da experiência. Embora a injeção de combustível nos motores de combustão interna seja intermitente, os dados obtidos experimentalmente por Hiroyasu e Arai [29] que vão ser alvo de comparação, foram obtidos através da injeção contínua de combustível, daí as simulações serem realizadas também em regime contínuo.

Informações relativas à geometria do atomizador e às condições de injeção estão presentes nas tabelas seguintes, o meio gasoso em que é feita a injeção é composto por ar.

Tabela 4.3: Geometria do atomizador utilizada no estudo.

Diâmetro, d [mm]	Comprimento, L [mm]	Lábio de entrada, r [mm]	L/d
0,3	1,2	0	4

Tabela 4.4: Condições de injeção relevantes.

Tempo de injeção	Contínuo
Combustível	Diesel
Viscosidade dinâmica do combustível [N.s/m ²]	0,0026
Tensão superficial do combustível [N/m]	0,0285
Densidade do combustível [kg/m ³]	827
Temperatura de injeção [K]	298,15

As nuvens de gotas Diesel obtidas para diferentes velocidades são apresentadas na Figura 4.11, permitindo a observação da evolução da nuvem com o aumento da velocidade. A primeira característica a ser alvo de comparação é o ângulo da nuvem de gotas. Como explicado no Capítulo 2, este ângulo é formado por duas linhas rectas traçadas da ponta do injector para a periferia exterior da nuvem de gotas, a uma distância de sessenta vezes o diâmetro do atomizador, a jusante deste, como se pode verificar na Figura 2.18 [30].

Assim, recorreu-se a um plano de amostragem colocado 18 mm a jusante do atomizador, que permitiu identificar a amplitude deste ângulo.

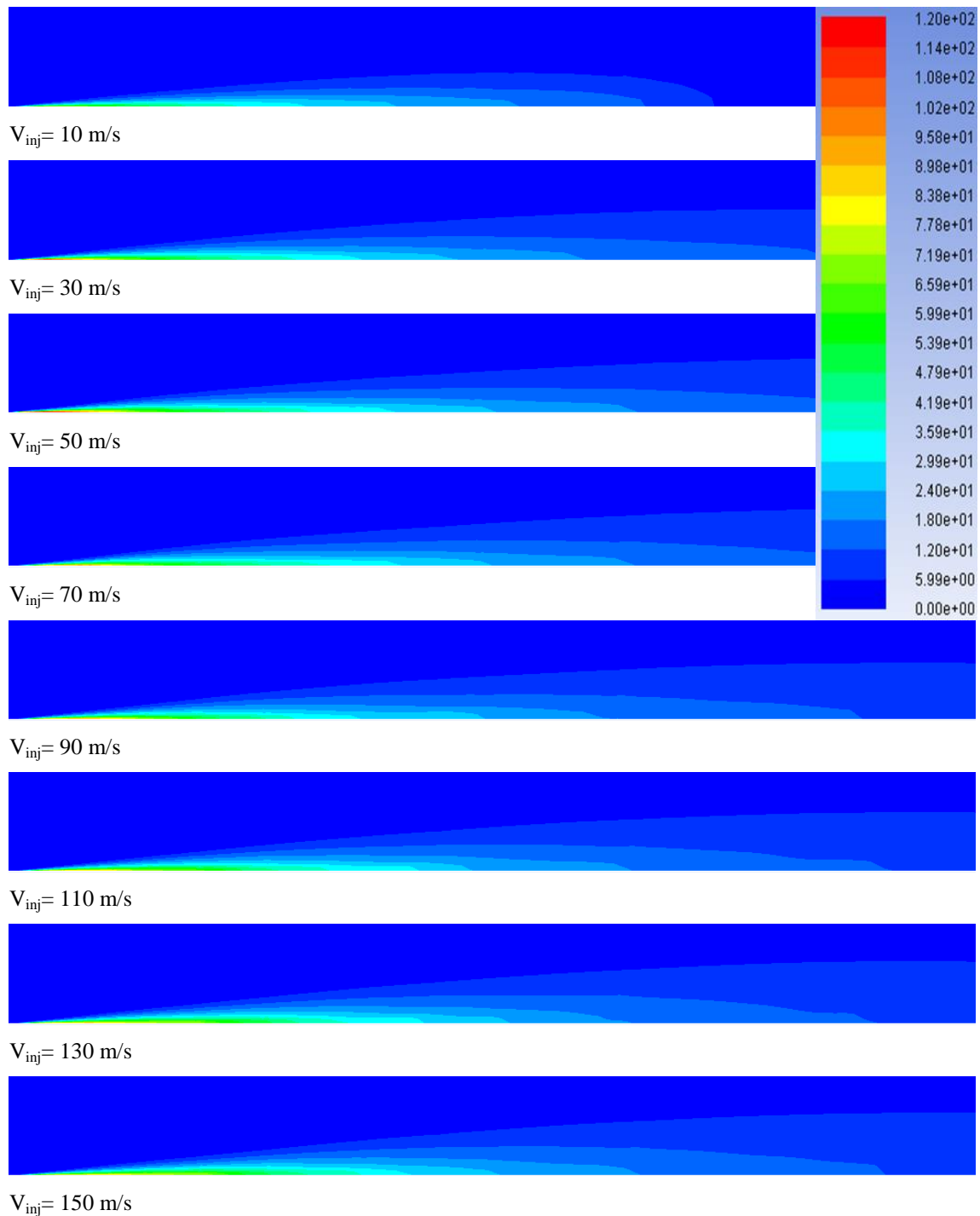


Figura 4.11: Mapas de magnitude da velocidade das gotas Diesel, em m/s, com o aumento da velocidade de injeção, ao longo do eixo do jacto.

Pela Figura 4.11, observa-se que o ângulo da nuvem de gotas aumenta com o aumento da velocidade de injeção até uma determinada amplitude onde depois se mantém quase constante. Esta situação é comprovada pela Figura 4.12 que apresenta os resultados obtidos pelo modelo numérico e os resultados experimentais de Hiroyasu e Arai [29].

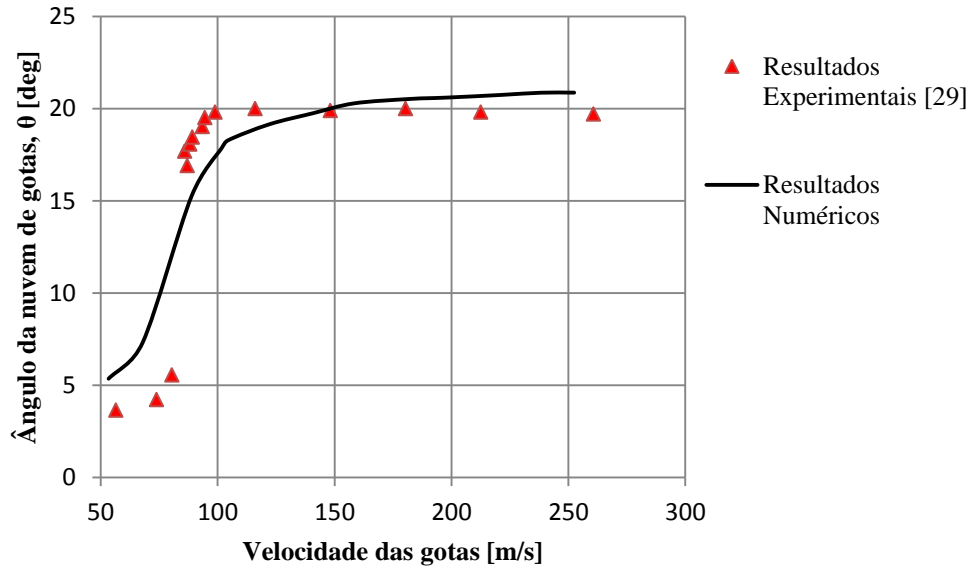


Figura 4.12: Comparação dos valores do ângulo da nuvem de gotas.

A segunda característica a comparar é o *SMD*. Para as medições de *SMD* para um regime de injeção contínua, Hiroyasu e Arai recorreram à técnica de difracção de Fraunhofer, e a medição foi efectuada a 70 mm do atomizador [29]. Assim, recorreu-se a um plano de amostragem colocado 70 mm a jusante do atomizador, de modo a recolher a amostra dos diâmetros das gotas. A Figura 4.13 apresenta os resultados obtidos pelo modelo numérico e os resultados experimentais de Hiroyasu e Arai [29].

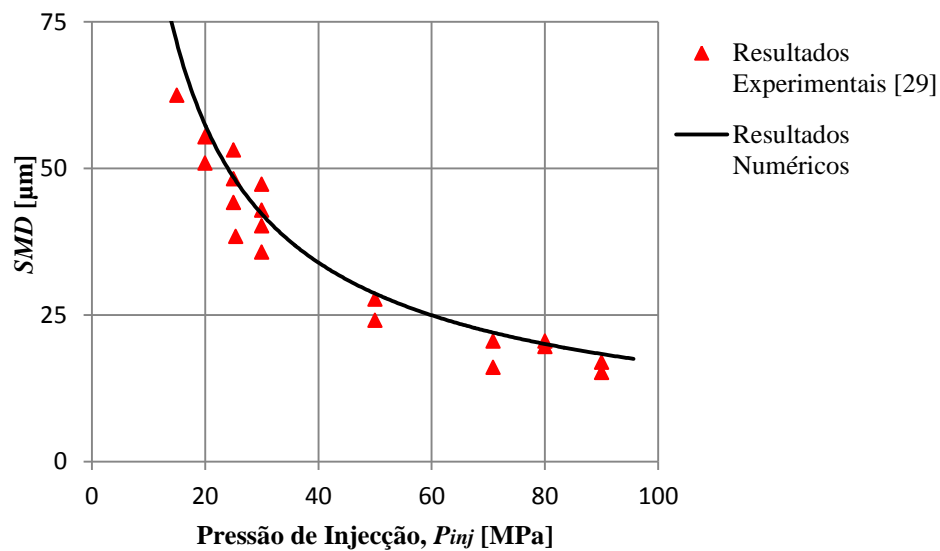


Figura 4.13: Comparação dos valores de *SMD*.

4.6.3 Conclusões da Validação

O modelo numérico foi utilizado com vista a estudar a atomização do combustível Diesel e a solução foi validada recorrendo aos resultados experimentais documentados por Hiroyasu e Arai [29]. Verificou-se que o modelo consegue prever com uma precisão apreciável as características da nuvem de gotas resultantes da injeção, uma vez que foi observado um desvio inferior a 5% para o ângulo da nuvem de gotas, bem como para o *SMD*.

Adicionalmente, com o aumento da velocidade e da pressão de injeção o desvio diminui, o que aumenta a confiança no modelo uma vez que a pressão de injeção Diesel geralmente assume valores acima de 100 MPa.

Conclui-se assim pelo estudo apresentado, que o modelo é suficientemente preciso e pode ser utilizado para prever as características das nuvens de gotas resultantes da injeção de combustível Diesel.

Capítulo 5

Resultados

No presente capítulo, recorre-se ao modelo numérico validado no capítulo anterior para estudar a atomização de fuelóleos, combustíveis tipicamente utilizados em grandes motores Diesel marítimos, focando a atenção no *SMD*.

5.1 Fuelóleos à Temperatura Ambiente

O efeito das propriedades dos combustíveis na atomização é investigado através da realização de simulações com os fuelóleos leve, intermédio e pesado, nas mesmas condições anteriormente utilizadas para o combustível Diesel, considerando a temperatura ambiente e o ar como meio gasoso circundante. A geometria do atomizador mantém-se e os seus detalhes estão presentes na Tabela 4.3. As condições de injeção relevantes estão presentes na tabela seguinte.

Tabela 5.1: Condições de injeção dos combustíveis em estudo.

Tempo de injeção	Contínuo			
Combustível	Diesel	Fuelóleo Leve	Fuelóleo Intermédio	Fuelóleo Pesado
Viscosidade dinâmica do combustível [N.s/m ²]	0,0026	0,1013	0,3099	0,9996
Tensão superficial do combustível [N/m]	0,0285	0,0327	0,0336	0,0343
Densidade do combustível [kg/m ³]	827	921	939	952
Temperatura de injeção [K]	298			

As nuvens de gotas obtidas a uma velocidade de injeção de 120 m/s são apresentadas na Figura 5.1, onde se verifica que para aquela velocidade de injeção a diferença entre os ângulos das nuvens de gotas é reduzida, facto já constatado por Hiroyasu e Arai [29] que verificaram o decréscimo da importância da viscosidade do líquido neste ângulo com o aumento da pressão de injeção e, consequentemente da velocidade de injeção, conforme se pode observar na Figura 2.19 [29].

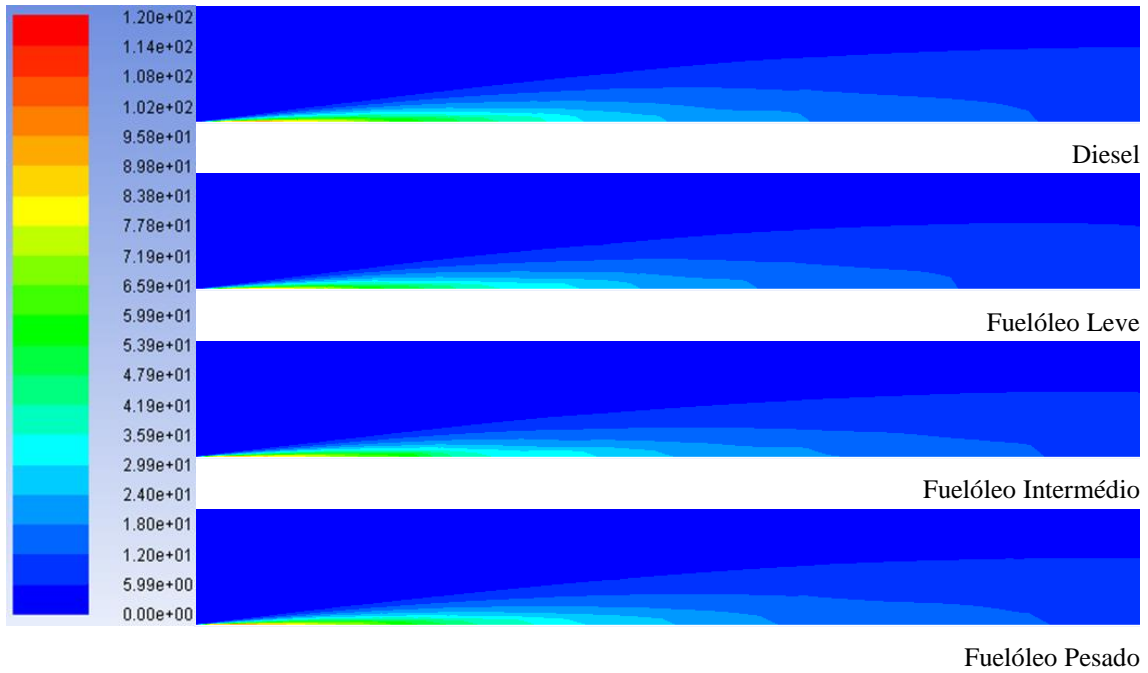


Figura 5.1: Mapas de magnitude da velocidade das gotas dos combustíveis estudados, em m/s, ao longo do eixo do jacto.

Na Figura 5.2 são apresentados os resultados das simulações para os diferentes combustíveis, onde se constata que o *SMD* é significativamente mais elevado no caso dos fuelóleos, comprovando que um dos factores que tem mais influência no processo de atomização do combustível é a sua viscosidade.

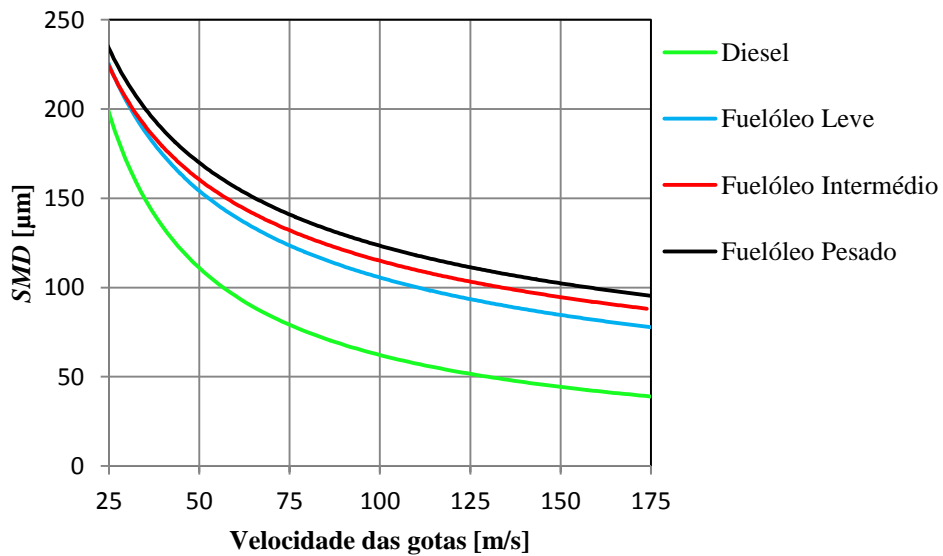


Figura 5.2: Valores de *SMD* dos combustíveis estudados.

Em comparação com o combustível Diesel, os valores de *SMD* para os fuelóleos são sempre entre 40 a 55 μm superiores. Verifica-se que para uma velocidade de 150 m/s, para o combustível Diesel o *SMD* assume o valor de 46 μm , enquanto para os fuelóleos leve, intermédio e pesado é de 88, 93 e 101 μm respectivamente.

5.2 Fuelóleos Aquecidos

Contudo, os fuelóleos utilizados nos grandes motores Diesel marítimos passam por várias etapas de pré-aquecimento até chegarem ao sistema de injeção. A tecnologia do sistema de alimentação de combustível pode variar de fabricante para fabricante, mas todos os sistemas devem fornecer combustível limpo, com a viscosidade adequada e à pressão correcta a cada motor. O controlo da temperatura é fundamental para manter o combustível com uma viscosidade correcta e estável.

A Figura 5.3 [51] apresenta o diagrama utilizado pelo fabricante WÄRTSILÄ para determinar as temperaturas de cada etapa de aquecimento dos fuelóleos, onde se verifica o decréscimo da viscosidade com o aumento de temperatura. De seguida, apresenta-se uma breve explicação de como utilizar o diagrama.

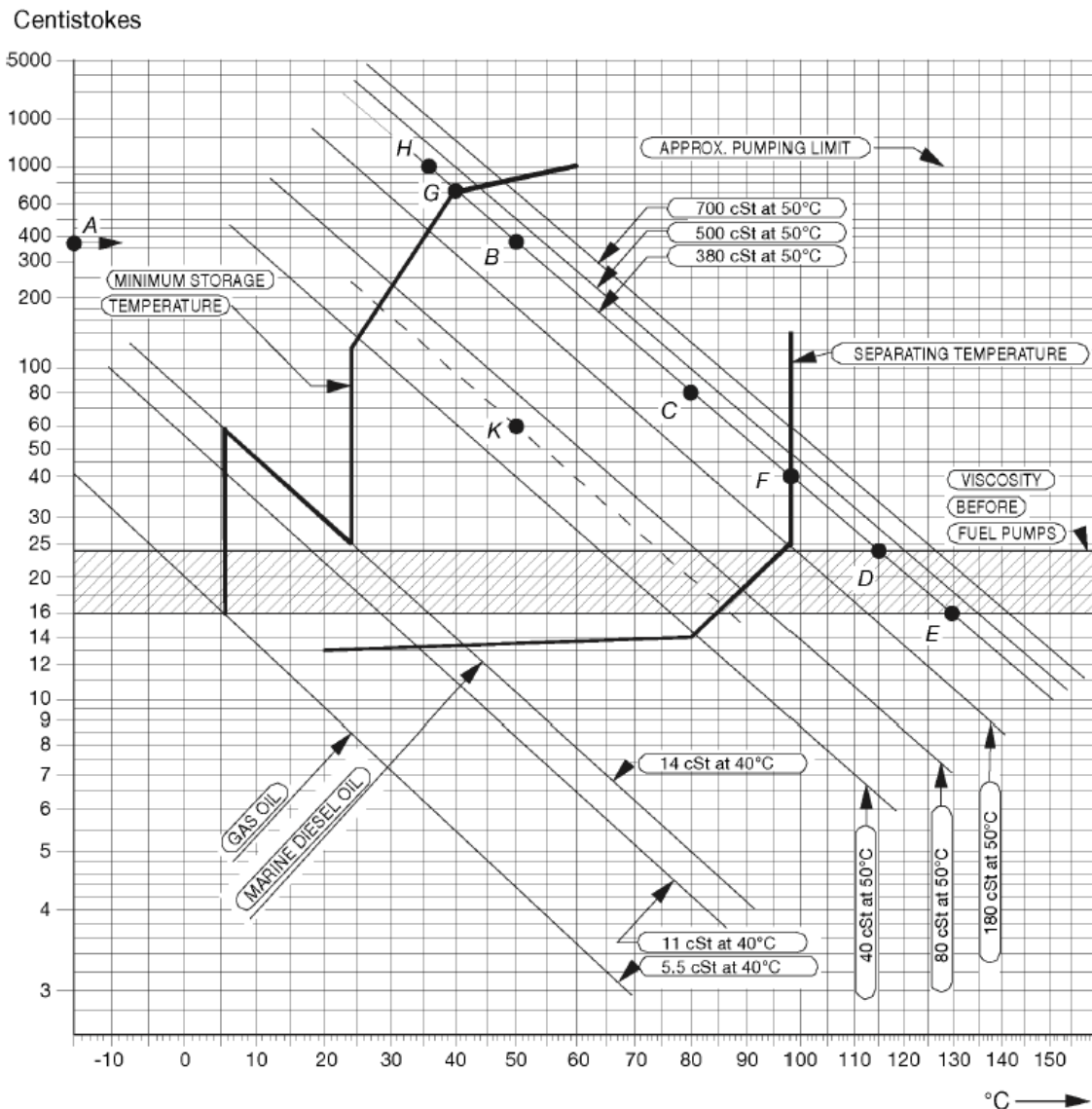


Figura 5.3: Diagrama Temperatura – Viscosidade dos combustíveis [51].

Considerando, a título de exemplo, um fuelóleo com uma viscosidade de 380 cSt (A) a 50°C (B), basta seguir a linha viscosidade/temperatura para obter todas as temperaturas adequadas ao correcto funcionamento do sistema de alimentação de combustível. Assim, verifica-se que este fuelóleo pode-se não ser bombeável dos depósitos a uma temperatura inferior a 36°C (H), como tal é indicada uma temperatura de 40°C (G) como mínimo para armazenamento nos tanques. O fuelóleo tem ainda de ser aquecido a 98°C (F) antes de entrar no separador, que se encarrega de limpar quaisquer resíduos presentes no combustível. Por último, o fuelóleo tem de ser aquecido a uma temperatura entre 115 a 130°C (D-E) antes de entrar nas bombas de injeção.

Para obter as temperaturas para outras viscosidades não presentes no diagrama basta desenhar uma linha a partir do ponto de viscosidade/temperatura conhecido em paralelo à linha de viscosidade/temperatura mais próxima. As temperaturas mínimas de entrada nas bombas de injeção para os fuelóleos em estudo são apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Temperaturas de pré-aquecimento dos fuelóleos.

Combustível	Fuelóleo Leve	Fuelóleo Intermédio	Fuelóleo Pesado
Viscosidade cinemática do combustível [cSt]	110	330	1050
Temperatura de injeção [K]	333,15	354,15	383,15

As nuvens de gotas dos fuelóleos aquecidos, obtidas a uma velocidade de injeção de 120 m/s, são apresentadas na Figura 5.4.

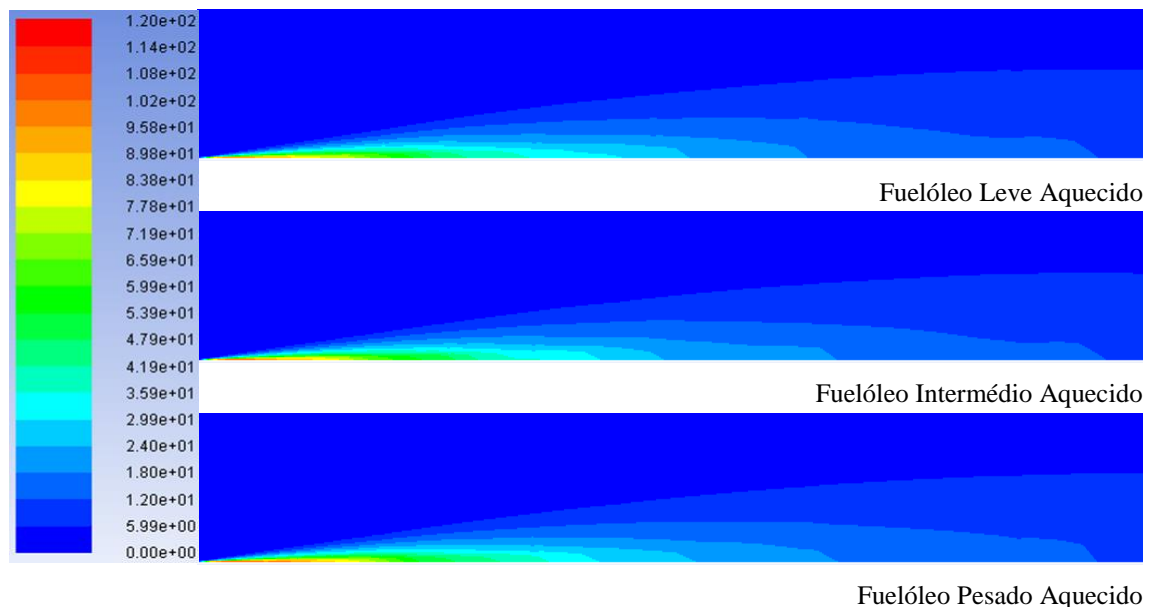


Figura 5.4: Mapas de magnitude da velocidade das gotas dos fuelóleos aquecidos, em m/s, ao longo do eixo do jacto.

Na Figura 5.5 são apresentados os resultados das simulações para os fuelóleos aquecidos, tendo em conta as temperaturas de injeção apresentadas na Tabela 5.2, verificando-se um decréscimo nos valores de *SMD*, que mesmo com o pré-aquecimento assume valores superiores em relação ao combustível Diesel à temperatura ambiente.

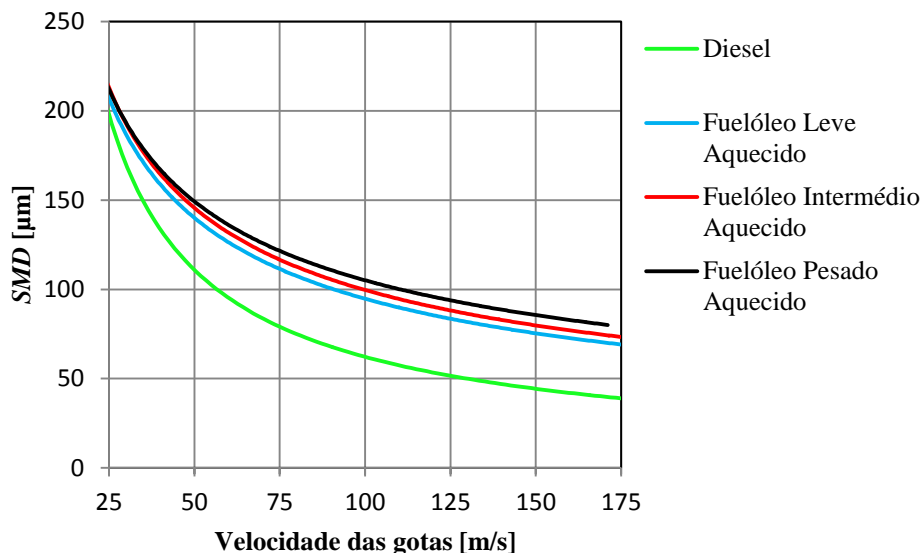


Figura 5.5: Valores de *SMD* dos fuelóleos aquecidos.

Mesmo com este aumento de temperatura as diferenças ainda são significativas em relação ao Diesel, pois para a mesma velocidade de injeção de 150 m/s, o *SMD* assume valores de 74, 80 e 82 μm para os fuelóleos leve, intermédio e pesado respectivamente. Nas figuras seguintes são apresentados os resultados para cada fuelóleo em comparação com o Diesel, onde se torna mais evidente a diferença do *SMD*, mesmo com o pré-aquecimento.

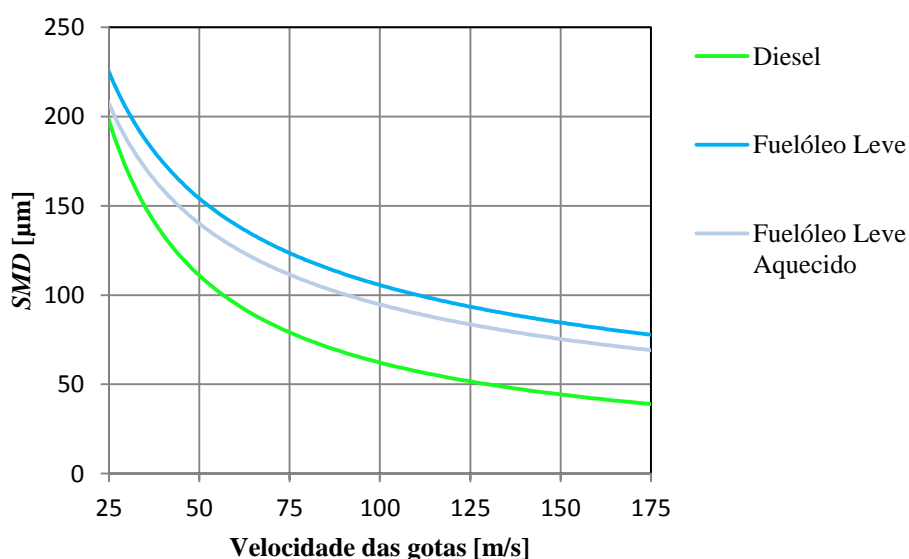


Figura 5.6: Comparação dos resultados de *SMD* do fuelóleo leve.

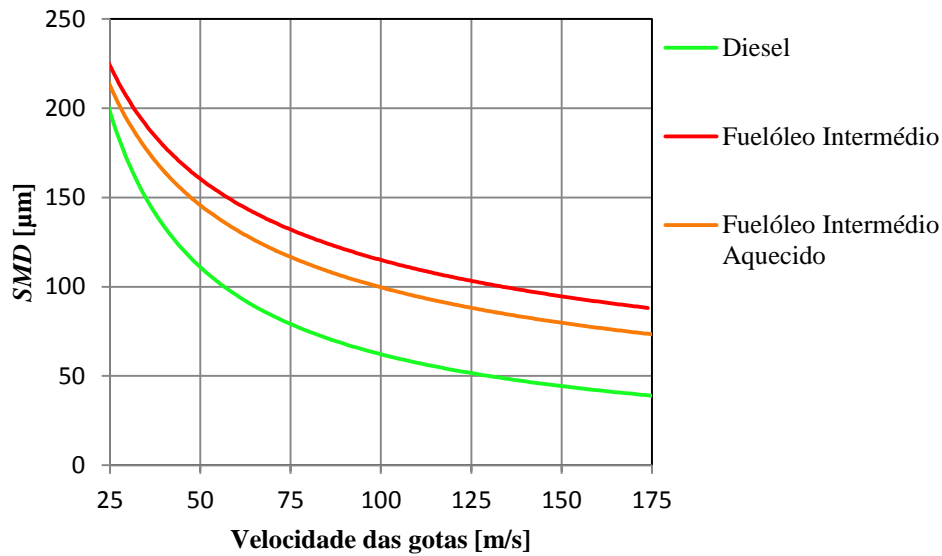


Figura 5.7: Comparação dos resultados de *SMD* do fuelóleo intermédio.

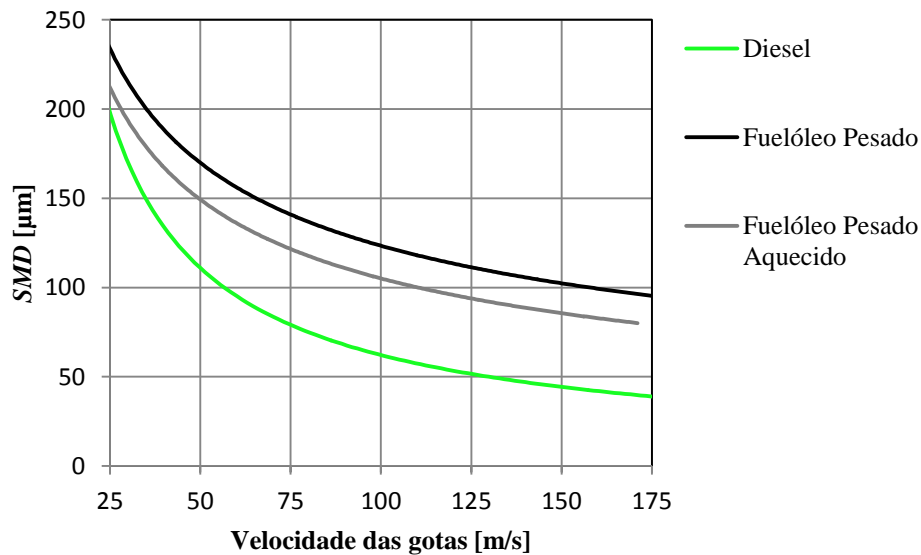


Figura 5.8: Comparação dos resultados de *SMD* do fuelóleo pesado.

Constata-se no entanto, que apesar das diferenças nas características iniciais dos fuelóleos, principalmente ao nível da viscosidade, ao sofrerem o pré-aquecimento indicado pelo diagrama da WÄRTSILÄ, todos convergem para valores muito semelhantes de *SMD*, com diferenças inferiores a $10 \mu\text{m}$ entre os três fuelóleos. Este facto sugere não só a presença de uma gama de valores de *SMD* que não compromete o funcionamento dos motores daquele fabricante, como também a presença de um valor limite de viscosidade, para o qual a exigência energética necessária a reduzir a viscosidade do combustível não compense em prol da melhoria da atomização.

Capítulo 6

Conclusão

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado e ainda sugestões para desenvolvimentos futuros.

6.1 Conclusões Principais

O trabalho desenvolvido nesta dissertação centrou-se essencialmente no estudo do padrão de atomização do combustível Diesel e combustíveis alternativos, nomeadamente fuelóleos leve, intermédio e pesado, com interesse para grandes motores Diesel marítimos.

Inicialmente procedeu-se ao estudo da atomização calculando, com base em relações empíricas da literatura, o comprimento de desintegração, o ângulo da nuvem de gotas e o *SMD*, dos combustíveis estudados. O cálculo destas características das nuvens de gotas permitiu uma primeira avaliação das diferenças entre os resultados dos três fuelóleos e também servir de termo de comparação aos resultados esperados no decorrer da dissertação.

Foi criado um modelo numérico tendo por base o programa comercial ANSYS FLUENT e o seu modelo de fase dispersa, *DPM*. Para aplicar este modelo efectuou-se uma malha estruturada bidimensional com elementos quadriláteros, e procedeu-se ao estudo de independência desta. Depois desenvolveu-se todo o código numérico através dos submodelos necessários à aplicação do modelo de fase dispersa, para finalmente simular a atomização do combustível Diesel de modo a obter a validação do modelo. A validação foi feita com resultados experimentais presentes na literatura e os resultados das simulações apresentam uma precisão consistente com estes, uma vez que foi observado um desvio inferior a 5% para o ângulo da nuvem de gotas, bem como para o *SMD*, sendo que as simulações foram efectuadas nas mesmas condições do estudo experimental.

Concluída a validação do modelo numérico iniciou-se o estudo do *SMD* na atomização dos fuelóleos. Primeiro efectuaram-se as simulações considerando a temperatura ambiente e o ar como meio gasoso circundante. Os resultados mostram claramente a influência das propriedades dos combustíveis nas características das nuvens de gotas. Em comparação com o combustível Diesel, os valores de *SMD* para os fuelóleos são sempre entre 40 a 55 μm superiores. Considerando uma velocidade de injeção de 150 m/s, para o combustível Diesel o *SMD* assume o valor de 46 μm , enquanto para os fuelóleos leve, intermédio e pesado é de 88, 93 e

101 μm respectivamente. Todos os resultados são consistentes com as dimensões das gotas aumentarem com o aumento da viscosidade do combustível.

Posteriormente, recorrendo ao diagrama Temperatura – Viscosidade da WÄRTSILÄ elevou-se a temperatura de injeção dos fuelóleos, que passou da temperatura ambiente, 298,15 K, para 333,15 K no caso do fuelóleo leve, 354,15 K no caso do fuelóleo intermédio e 383,15 K no caso do fuelóleo pesado, comparando os resultados obtidos com os do Diesel à temperatura ambiente. Mesmo com este aumento de temperatura as diferenças ainda são significativas em relação ao Diesel, pois para a mesma velocidade de injeção de 150 m/s, o *SMD* assume valores de 74, 80 e 82 μm para os fuelóleos leve, intermédio e pesado respectivamente. No entanto, com este aumento de temperatura, apesar das diferenças nas características iniciais dos fuelóleos, principalmente ao nível da viscosidade, todos convergem para valores muito semelhantes de *SMD*, com diferenças inferiores a 10 μm entre os três fuelóleos.

Considerando-se a aplicação de fuelóleos em motores Diesel, a sua viscosidade deve ser reduzida para valores adequados de forma a não comprometer a atomização. Esta redução pode ser conseguida através do aumento da temperatura de pré-aquecimento para valores superiores aos estudados nesta dissertação. Contudo há que ter em atenção se o dispêndio energético no aquecimento do fuelóleo compensa a melhoria na atomização.

Para finalizar, fica também demonstrado que o código comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional utilizado nesta dissertação, ANSYS FLUENT, é uma ferramenta útil no estudo da atomização de combustíveis.

6.2 Sugestões Para Trabalho Futuro

No que respeita a desenvolvimentos futuros, seria interessante tomar a presente dissertação com ponto de partida e estudar aspectos importantes da atomização que não foram abordados. Numa primeira fase, pode efectuar-se um estudo mais detalhado da influência da viscosidade dos combustíveis no ângulo de nuvem de gotas e no comprimento de desintegração.

Numa segunda fase podem-se proceder a simulações em regime transiente de modo a avaliar a penetração da nuvem de gotas para os diversos combustíveis. Também seria interessante repetir todo o estudo mas recorrendo a uma malha tridimensional, e comparar os resultados obtidos.

Por último, implementar um modelo de combustão que permita prever as emissões poluentes resultantes da injeção dos fuelóleos é sem dúvida um trabalho que contribuiria para completar todos estes desenvolvimentos no estudo da atomização de fuelóleos.

Referências Bibliográficas

- [1] Lefebvre, A. H., *Atomization and Sprays*, Taylor and Francis, USA, 1989.
- [2] ASTM E1260-03, *Standard Test Method for Determining Liquid Drop Size Characteristics in a Spray Using Optical Nonimaging Light-Scattering Instruments*, 2009.
- [3] ASTM E1260-97, *Standard Terminology Relating to Liquid Particles and Atomization*, 2012.
- [4] ASTM E799-03, *Standard Practice for Determining Data Criteria and Processing for Liquid Drop Size Analysis*, 2009.
- [5] ISO 13320, *Particle size analysis - Laser diffraction methods*, 2009.
- [6] Lefebvre, A. H., e Ballal, D. R., *Gas Turbine Combustion – Alternative Fuels and Emissions*, Taylor and Francis, 3rd Ed, USA, 2010.
- [7] Baumgarten, C., *Mixture Formation in Internal Combustion Engines*, Springer, USA, 2006.
- [8] Reitz, R.D., *Atomization and Other Breakup Regimes of a Liquid Jet*, Ph.D. Thesis, Mechanical and Aerospace Department, Princeton University, Princeton, New Jersey, USA, 1978.
- [9] Schneider, B. M., *Experimentelle Untersuchungen zur Spraystruktur in Transienten, Verdampfenden und Nicht Verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck*, Ph.D. Thesis, Technische Wissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Schweiz, 2003.
- [10] Coelho, P., e Costa, M., *Combustão*, Edições Orion, Portugal, 2007.
- [11] Gulder, O. L., “Views on the Structure of Transient Diesel Sprays”, *Atomization and Sprays*, 10 (3-5), pp. 355-386, 2000.
- [12] Bianchi, G. M., Pelloni, P., e Toninel, S., “A Quasi-Direct 3D Simulation of the Atomization of High Speed Liquid Jets”, *American Society of Mechanical Engineers Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference*, Chicago, USA, 2005.

- [13] Faeth, G. M., Hsiang, L. P., e Wu, P. K., “Structure and Breakup Properties of Sprays”, *International Journal of Multiphase Flow*, 21 (Supplement), pp. 99-127, 1995.
- [14] Wierzba, A., “Deformation and Breakup of Liquid Drops in a Gas Stream at Nearly Critical Weber Numbers”, *Experiments in Fluids*, 9 (1-2), pp. 59-64, 1990.
- [15] Rotondi, R., Bella, G., Grimaldi, C., e Postrioti, L., “Atomization of High-Pressure Diesel Spray: Experimental Validation of a New Breakup Model”, *Society of Automotive Engineers Technical Paper 2001-01-1070*, 2001.
- [16] Chaves, H., Kirmse, C., e Obermeier, F., “Velocity Measurement of Dense Diesel Fuel Sprays in Dense Air”, *Atomization and Sprays*, 14 (6), pp. 589-609, 2004.
- [17] Salters, D. G., “The Breakup Zone of a Diesel Spray: Part 1, Length of Zone and Volume of Unatomized Liquid”, *Atomization and Sprays*, 5 (2), pp. 157-174, 1995.
- [18] Bayvel, L. P., e Orzechowski, Z., *Liquid Atomization*, Taylor and Francis, USA, 1993.
- [19] Liu, H., *Science and Engineering of Droplets*, William Andrew Publishing, USA, 2000.
- [20] Ashgriz, N., *Handbook of Atomization and Sprays*, Springer, USA, 2011.
- [21] Tate, R. W., “Sprays”, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 23, 5th Ed, John Wiley and Sons, USA, 2006.
- [22] Lorenzetto, G. E., e Lefebvre, A. H., “Measurements of Drop Size on a Plain-Jet Airblast Atomizer”, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 15 (7), pp. 1006-1010, 1977.
- [23] Dent, J. C., “A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration”, *Society of Automotive Engineers Technical Paper 710571*, 1971.
- [24] De Corso, S. M., “Effect of Ambient and Fuel Pressure on Spray Drop Size”, *American Society of Mechanical Engineers Journal of Engineering for Power*, 82 (1), pp. 10-18, 1960.
- [25] Neya, K., e Sato, S., “Effect of Ambient Air Pressure on the Spray Characteristics of Swirl Atomizers”, *Ship Research Institute Paper 27*, 1968.

- [26] Rizk, N. K., e Lefebvre, A. H., “Spray Characteristics of Spill-Return Atomizer”, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal of Propulsion and Power*, 1, pp. 200-204, 1985.
- [27] Wang, X. F., e Lefebvre, A. H., “Influence of Ambient Air Pressure on Pressure-Swirl Atomization”, *Atomization and Spray Technology*, 3 (3), pp. 209-226, 1987.
- [28] Shimizu, M., Arai, M., e Hiroyasu, H., “Measurements of Breakup Length in High Speed Jet”, *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers International Journal*, 27 (230), pp. 1709-1715, 1984.
- [29] Hiroyasu, H., e Arai, M., “Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines”, *Society of Automotive Engineers Technical Paper 900475*, 1990.
- [30] Arai, M., Tabata, M., Hiroyasu, H., e Shimizu, M., “Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle”, *Society of Automotive Engineers Technical Paper 840275*, 1984.
- [31] ANSYS, *ANSYS FLUENT User’s Guide*, ANSYS Inc., USA, 2011.
- [32] Mugele, R. A., e Evans, H. D., “Droplet Size Distribution in Sprays”, *Industrial and Engineering Chemistry*, 43 (6), pp. 1317-1324, 1951.
- [33] Hiroyasu, H., e Kadota, T., “Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber”, *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers*, 19 (135), pp. 1064-1072, 1976.
- [34] Reitz, R. D., e Diwakar, R., “Structure of High-Pressure Fuel Sprays”, *Society of Automotive Engineers Technical Paper 870598*, 1987.
- [35] Tabata, M., Fujii, H., Arai, M., e Hiroyasu, H., “Mean Drop Diameter of a Diesel Spray in a Vaporizing Process”, *Japan Society of Mechanical Engineers International Journal*, 34 (3), pp. 369-378, 1991.
- [36] Vaz, D. C., *Implementação da Estratégia de Recirculação de Gases Para a Redução das Emissões dos Óxidos de Azoto*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 1998.

- [37] Arrègle, J. M., Pastor, J. V., e Ruiz, S., “The Influence of Injection Parameters on Diesel Spray Characteristics”, *Society of Automotive Engineers Technical Paper 1999-01-0200*, 1999.
- [38] Wu, P. K., e Faeth, G. M., “Onset and End of Drop Formation Along the Surface of Turbulent Liquid Jets in Still Gases”, *Physics of Fluids*, 7 (11), pp. 2915-2917, 1995.
- [39] Faeth, G. M., “Spray Combustion Phenomena”, *Symposium (International) on Combustion*, 26 (1), pp. 1593-1612, 1996.
- [40] Lee, K., Aalburg, C., Diez, F. J., Faeth, G. M., e Sallam, K. A., “Primary Breakup of Turbulent Round Liquid Jets in Uniform Crossflows”, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 45 (8), pp. 1907-1916, 2007.
- [41] Versteeg, H. K., e Malalasekera, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method*, Longman Scientific and Technical, England, 1995.
- [42] Spalart, P., e Allmaras, S., “A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows”, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper 92-0439*, 1992.
- [43] Launder, B. E., e Spalding, D. B., *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, England, 1972.
- [44] Yakhot, V., e Orszag, S. A., “Renormalization Group Analysis of Turbulence”, *Journal of Scientific Computing*, 1 (1), pp. 3-51, 1986.
- [45] Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., e Zhu, J., “A New k - ϵ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation”, *Computers Fluids*, 24 (3), pp. 227-238, 1995.
- [46] Reitz, R. D., e Bracco, F. B., “On the Dependence of Spray Angle and Other Spray Parameters on Nozzle Design and Operating Conditions”, *Society of Automotive Engineers Technical Paper 790494*, 1979.
- [47] Reitz, R. D., “Mechanisms of Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays”, *Atomization and Spray Technology*, 3 (4), pp. 309-337, 1987.

- [48] Kong, S. C., Senecal, P. K., e Reitz, R. D., “Development in Spray Modeling in Diesel and Direct-Injection Gasoline Engines”, *Oil & Gas Science and Technology*, 54 (2), pp. 197-204, 1999.
- [49] O'Rourke, P. J., *Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays*, Ph.D. Thesis, Princeton University, Princeton, New Jersey, USA, 1981.
- [50] Merker, G. P., Schwarz, C., Stiesch, G., e Otto, F., *Simulating Combustion*, Springer, Germany, 2004.
- [51] WÄRTSILÄ, *WÄRTSILÄ Engines Product Guide*, WÄRTSILÄ Corporation., Finland, 2009.